



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση στοχαστικού προβλήματος βέλτιστης ένταξης
μονάδων υπό αβεβαιότητα σε μικροδίκτυο και σύγκριση
αποτελεσμάτων με αντίστοιχο ντετερμινιστικό μοντέλο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελετιές Χ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση στοχαστικού προβλήματος βέλτιστης ένταξης
μονάδων υπό αβεβαιότητα σε μικροδίκτυο και σύγκριση
αποτελεσμάτων με αντίστοιχο ντετερμινιστικό μοντέλο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελετιές Χ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Μαρτίου 2022:

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

(Υπογραφή)

.....

ΜΕΛΕΤΙΕΣ Χ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μελετιές Χ. Κωνσταντίνος, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ραγδαίες και ριζικές μεταρρυθμίσεις που λαμβάνουν χώρα στις ευρωπαϊκές αγορές ενέργειας αλλάζουν δραματικά το ενεργειακό τοπίο. Η ανάγκη για μεγαλύτερη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε συνδυασμό με τον ευρωπαϊκό στόχο για μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από το τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν σε διάφορες μεταρρυθμίσεις για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Για τη μετάβαση λοιπόν σε μια αγορά ενέργειας που να συνδυάζει υψηλές περιβαλλοντικές προδιαγραφές καθώς επίσης και υπηρεσίες υψηλού επιπέδου, οι οποίες να προσφέρονται σε όσο το δυνατό χαμηλότερο κόστος μπορεί να γίνει εφικτή μόνο με την ανάπτυξη έξυπνων δικτύων. Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια νέων τεχνολογιών μετατρέπονται από παθητικά δίκτυα σε ενεργά συστήματα που περιλαμβάνουν διεσπαρμένες πηγές ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρονικά ισχύος και ευέλικτα φορτία. Η διαχείριση λοιπόν αυτών το συστημάτων γίνεται ιδιαίτερα απαιτητική αφού οι αρμόδιοι φορείς καλούνται να διαχειριστούν ένα τεράστιο όγκο δεδομένων ο οποίος εκτυλίσσεται από τα δεδομένα καταμέτρησης έξυπνων ηλεκτρονικών μετρητών μέχρι τις μετρήσεις σε κάθε σημείο του δικτύου.

Συστατικό κλειδί για τη μετάβαση σε ένα νέο πολύ-σύνθετο μοντέλο αγοράς με ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών στην αγορά ενέργειας, αμφίδρομη επικοινωνία και ροή πληροφορίας αποτελούν τα μικροδίκτυα. Τα μικροδίκτυα αποτελούν την πλατφόρμα ενσωμάτωσης αυξημένου όγκου διεσπαρμένης παραγωγής και των συστημάτων αποθήκευσης στο υπάρχον σύστημα διευκολύνοντας τη διαχείριση του. Μεταφέροντας τις διεργασίες ελέγχου στα επιμέρους τμήματα του δικτύου (μικροδίκτυα), δημιουργείται ένα αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο προσδίδει περισσότερη ευελιξία στο σύστημα. Ακόμη η ενσωμάτωση της τεχνολογίας των μικροδικτύων μειώνει τις αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Ακόμη τοποθετώντας τις μονάδες παραγωγής πιο κοντά στα σημεία κατανάλωσης απαλείφονται σε σημαντικό βαθμό οι απώλειες μεταφοράς αυξάνοντας την συνολική απόδοση του συστήματος.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός στοχαστικού μοντέλου διαχείρισης μικροδικτύων το οποίο να αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των διαφόρων παραγόντων αβεβαιότητας που επηρεάζουν τη παραγωγή αλλά και την κατανάλωση με τελικό σκοπό την πιο οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου. Εν συντομία το μοντέλο μικροδικτύου που κατασκευάστηκε διαθέτει μια θερμική μονάδα παραγωγής, ένα αιολικό πάρκο και διάφορα φορτία. Το μικροδίκτυο βρίσκεται σε διασυνδεδεμένη λειτουργία με δυνατότητα ενεργειακών συναλλαγών μέσω προθεσμιακών συμβολαίων αλλά και μέσω της ενδοημερήσιας αγοράς ενέργειας σε αυξημένη τιμή. Τέλος, το μοντέλο καλείται να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις συμμετοχής στην προθεσμιακή αγορά ενέργειας και να κατασκευάσει το βέλτιστο ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό έτσι ώστε να καλύπτονται όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας του μικροδικτύου για τα διάφορα σενάρια φορτίου και αιολικής παραγωγής που κατασκευάζονται. Η απόδοση του στοχαστικού μοντέλου ελέγχεται στη συνέχεια με ένα αντίστοιχο ντετερμινιστικό μοντέλο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διαφόρων ειδών στοχαστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση προβλημάτων ένταξης μονάδων παραγωγής υπό αβεβαιότητα. Σε κάθε περίπτωση όμως η ευστοχία στη πρόβλεψη των τυχαίων μεταβλητών καθώς επίσης και η αποδοτική λειτουργία του στοχαστικού μοντέλου αποτελούν ακόμη σημαντικές προκλήσεις σε ερευνητικό επίπεδο.

Αδιαμφισβήτητα τα μικροδίκτυα αποτελούν το μέσο μετάβασης από τα παραδοσιακά ενεργοβόρα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σε νέα ευέλικτα και αποδοτικά συστήματα υψηλών περιβαλλοντικών προδιαγραφών. Η παρούσα διπλωματική εργασία καλείται να δώσει λύση στο πρόβλημα της βέλτιστης ένταξης μονάδων παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες αβεβαιότητας που ενσωματώνονται στο πρόβλημα λόγω της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και του απρόβλεπτου φορτίου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για επίλυση προβλημάτων ένταξης δύο σταδίων υπό αβεβαιότητα. Για την επίλυση του προβλήματος έγινε εφαρμογή της μεθόδου L-shape. Επιπρόσθετα για να διαβεβαιώσουμε την αποδοτικότητα της λειτουργίας του μικροδικτύου δημιουργούμε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση του συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας.

Το στοχαστικό μοντέλο λαμβάνει τις αποφάσεις για την διαχείριση των ενεργειακών πόρων του μικροδικτύου με γνώμονα το λειτουργικό κόστος. Τη διαδικασία βελτιστοποίησης πλαισιώνουν διάφοροι περιορισμοί λειτουργίας. Τα διάφορα σενάρια με τα οποία τροφοδοτείται το μοντέλο παράγονται μέσω της μεθόδου Μόντε Κάρλο. Τέλος η αποδοτικότητα των αποφάσεων που λαμβάνει το μοντέλο ελέγχεται μέσω ενός νέου τυχαίου συνόλου σεναρίων φορτίου και αιολικής παραγωγής.

Το στοχαστικό μοντέλο υλοποιήθηκε στο περιβάλλον της Python κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης `Pyomo`. Η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης έγινε με την βοήθεια του επιλυτή `Gurobi`.

Λέξεις κλειδιά : Μικροδίκτυο, Ενεργειακή Αγορά, Ένταξη Μονάδων Παραγωγής, Στοχαστικός Προγραμματισμός, Βελτιστοποίηση, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ABSTRACT

A variety of stochastic approaches have been widely used to address unit-commitment problems under uncertainty. However, the accurate estimation of uncertainty factors as well as the efficient operation of the stochastic model still pose significant challenges.

Undoubtedly, microgrids constitute the mean of transition from conventional energy-consuming power grids to modern, flexible, and efficient systems that follow high environmental standards. This thesis is addressing the optimization problem of unit commitment in a microgrid taking into account uncertainty factors that are integrated into the problem due to the high penetration of renewable energy sources and volatile load. For this purpose, a two-stage stochastic unit-commitment model with uncertainty is developed. The proposed model implements L-shape method to achieve an efficient solution process. Additionally, a second deterministic model is developed to assure the efficiency of the former and is used as a reference point for the total energy production cost.

The stochastic model manages microgrid's energy sources by considering the total operational cost. The optimization process also considers various constraints about unit-commitment, energy market and power system operation. Load and wind production scenarios are generated via the Monte Carlo method following a known probability distribution. After operation's decisions are made, the performance of the model is checked via another test sample.

The project's code is written in Python and Pyomo library was used to construct the optimization problem. Furthermore, optimal solution was approached using Gurobi solver.

Key words : Microgrid, Energy Market, Unit Commitment, Stochastic Programming, Optimization, Renewable Energy Sources

ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεφάλαιο 1 : Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στα Μικροδίκτυα. Ενημερώνει τον αναγνώστη για το τι είναι το μικροδίκτυο και τι είδη μικροδικτύων υπάρχουν. Επιπρόσθετα αναφέρεται στα διάφορα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων αλλά και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν. Τέλος, γίνεται μια μικρή αναφορά στο κομμάτι του ελέγχου στα μικροδίκτυα.

Κεφάλαιο 2 : Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην οργάνωση των ευρωπαϊκών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα της ελληνικής αγοράς ενέργειας. Το κεφάλαιο στοχεύει στην παροχή βασικών γνώσεων για την δομή και την λειτουργία των αγορών ενέργειας στον αναγνώστη.

Κεφάλαιο 3 : Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα στοχαστικά μοντέλα βέλτιστης ένταξης. Ακόμη, στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται μια μικρή εισαγωγή στα προβλήματα βελτιστοποίησης και στη μέθοδο L-shape.

Κεφάλαιο 4 : Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου βέλτιστης ένταξης μονάδων σε ένα μικροδίκτυο. Περιέχει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος καθώς επίσης και όλους τους περιορισμούς βελτιστοποίησης. Τέλος, περιγράφεται η μεθοδολογία επίλυσης που ακολουθήθηκε για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης.

Κεφάλαιο 5 : Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η αναφορά στα δεδομένα του προβλήματος. Περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των σεναρίων φορτίου και αιολικής παραγωγής με τα οποία τροφοδοτείται το μοντέλο. Δίνονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου και παρουσιάζεται το σενάριο βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 6: Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου, περιέχει διάφορα γραφήματα και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 7: Το έβδομο κεφάλαιο περιέχει τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και τις διάφορες πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 8 : Το όγδοο κεφάλαιο περιέχει την βιβλιογραφία της εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Χατζηαργυρίου Νικόλαου της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τον οποίο ευχαριστώ για την ανάθεση της, καθώς μου δόθηκε η ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω το υποψήφιο διδάκτορα κ. Πεδιαδίτη Παναγιώτη για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια ενασχόλησης μου με την εργασία, καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία που είχα μαζί του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω βαθύτατα τους γονείς μου Άννα και Χριστάκη που στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και συνέβαλαν τα μέγιστα σε κάθε μου βήμα. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη αγάπη και τη στήριξη τους.

Κωνσταντίνος Μελετιές
Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	10
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	14
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Ορισμός.....	15
1.3 Κατηγοριοποίηση Μικροδικτύων	17
1.4 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις.....	20
1.4.1 Πλεονεκτήματα	20
1.4.2 Προκλήσεις.....	22
1.5 Έλεγχος.....	23
ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Ευρωπαϊκή στρατηγική για την ενέργεια	26
2.3 Μοντέλο Ελληνικής Αγοράς Ενέργειας.....	27
2.3.1 Φορείς και συμμετέχοντες της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	28
2.3.2 Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	32
2.4 Πρόβλημα Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού.....	35
2.4.1 Σκοπός.....	35
2.4.2 Χρονικό Πλαίσιο.....	35
2.4.3 Συμμετοχές.....	36
2.4.4 Δεδομένα	37
2.4.5 Αντικειμενική Συνάρτηση.....	38
2.4.6 Περιορισμοί.....	38
2.4.7 Μεταβλητές-Αποτελέσματα Προβλήματος.....	38
2.5 Υφιστάμενο Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής.....	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	42
3.1 Εισαγωγή.....	42

3.2	Μαθηματική Βελτιστοποίηση	42
3.2.1	Γραμμικός Μαθηματικός Προγραμματισμός	43
3.2.2	Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός	43
3.2.3	Στοχαστικός Προγραμματισμός	43
3.3	Επιλυτής GUROBI	47
3.4	Στοχαστικά Μοντέλα Βέλτιστης Ένταξης	48
	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ.....	50
4.1	Εισαγωγή	50
4.2	Πίνακας συμβόλων	51
4.3	Κατασκευή προβλήματος	52
4.4	Μεθοδολογία Επίλυσης	54
	ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	57
5.1	Κατασκευή σεναρίων	57
5.2	Case Study	59
5.2.1	Παράμετροι	60
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	61
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	69
7.1	Συμπεράσματα	69
7.2	Επεκτάσεις	70
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

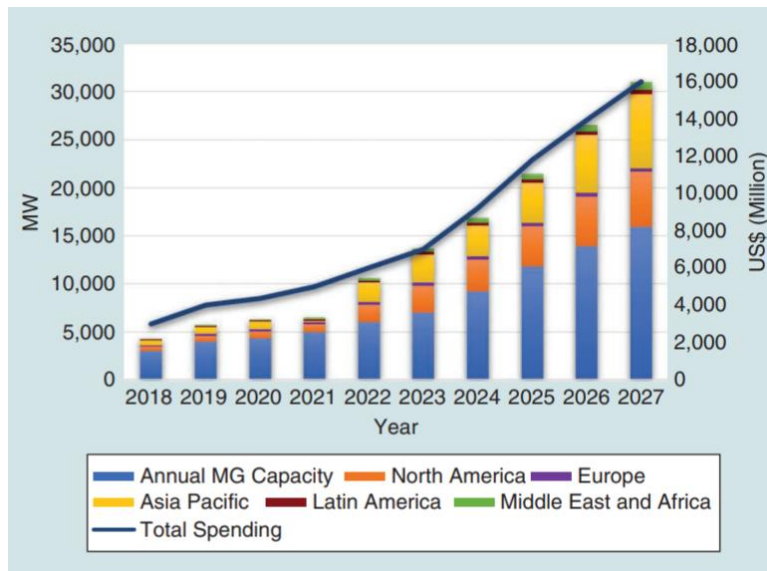
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας παρατηρείται ένας ταχύτατος εκσυγχρονισμός διαφόρων διαδικασιών ο οποίος αυξάνει σημαντικά τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, αρχίζουν σταδιακά να αδυνατούν να τροφοδοτήσουν τον αδηφάγο τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Επιπρόσθετα, η ηλεκτροπαραγωγή μέσω συμβατικών καυσίμων έχει ένα σημαντικά επιβλαβή αντίκτυπο στο περιβάλλον. Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσπάθεια μεταβολής του συμβατικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής σε ένα σύστημα βασισμένο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνεπώς, οι εφαρμογές και η δημοτικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται λόγω της εκτεταμένης τους χρησιμοποίησης και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ανάπτυξη ακόμη περισσότερων τεχνολογιών με σκοπό τη εκμετάλλευση των ΑΠΕ.

Το συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζει σταδιακά να γίνεται περισσότερο πολύπλοκο και επιρρεπές σε ζητήματα αξιοπιστίας και ευστάθειας λόγω της αυξημένης διεύθυνσης μονάδων ΑΠΕ. Η ταχύτατη εξάπλωση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και η χρήση των παραδοσιακών συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν το συνολικό σύστημα λιγότερο αξιόπιστο. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού προτείνονται συνεχώς νέες λύσεις όπως η διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ), μικροδίκτυα βασισμένα στις ΑΠΕ αλλά και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έρχονται σιγά σιγά στο προσκήνιο ως εφικτές λύσεις. Μία στατιστική έρευνα δείχνει στο Γράφημα 1-1 ότι προβλέπεται σημαντική αύξηση στην εγκατεστημένη ισχύ σε μικροδίκτυα με το σενάριο να προβλέπει πενταπλασιασμό της ισχύος εντός του χρονικού διαστήματος 2018-2027 [1] [2].



Γράφημα 1-1 Σενάριο ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος σε μικροδίκτυα (2018-2027)

Τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων τα καθιστούν συστήματα κλειδί για τα έξυπνα δίκτυα του αύριο. Με την ενσωμάτωση πολλών μικροδικτύων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται σημαντική αποκέντρωση στον έλεγχο του συστήματος καθιστώντας το πιο εύκολα διαχειρίσιμο και συνάμα πιο αξιόπιστο. Ακόμη η δυνατότητα νησιδοποίησης των μικροδικτύων αλλά και το πιο φιλικό περιβάλλον που δημιουργούν για την ευρύτερη χρησιμοποίησης τεχνολογιών ΑΠΕ αποτελούν τα κύρια τους πλεονεκτήματα.

1.2 Ορισμός

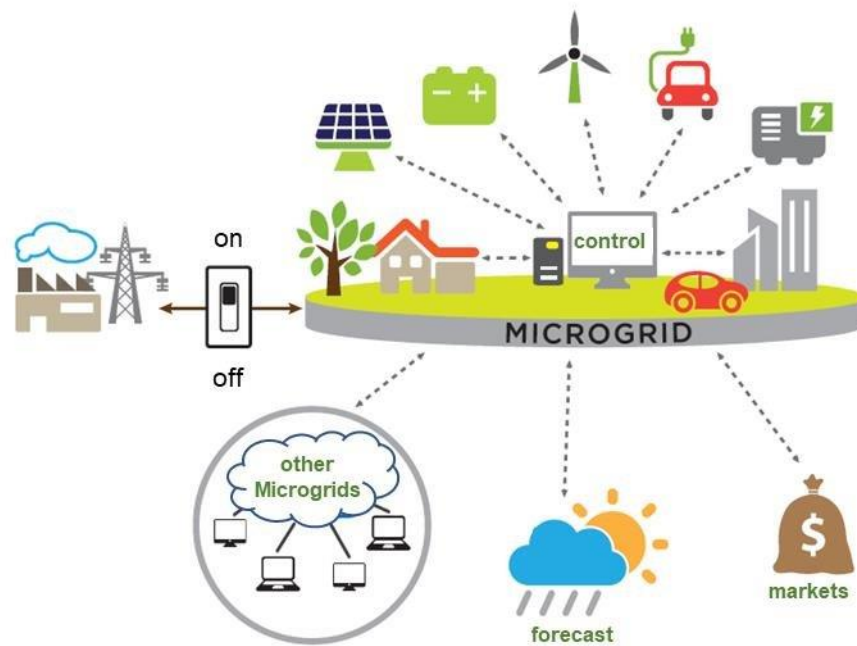
Ένα μικροδίκτυο αποτελείται από διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και τοπικά φορτία. Στόχος του μικροδικτύου είναι να εγγυάται την αδιάκοπη λειτουργία του συστήματος σε περιπτώσεις αστοχίας του κεντρικού δικτύου. Η σχετική βιβλιογραφία είναι γεμάτη από διάφορους ορισμούς αλλά και κατηγοριοποιήσεις για τα μικροδίκτυα. Ο λεπτομερής ορισμός που έχει δοθεί από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ είναι ο εξής :

“Μικροδίκτυο είναι ένα σύνολο που απαρτίζεται από διάφορα διασυνδεδεμένα φορτία και διεσπαρμένους ενεργειακούς πόρους εντός συγκεκριμένων ηλεκτρικών ορίων το οποίο συμπεριφέρεται ως μια ξεχωριστή ελεγχόμενη οντότητα που λειτουργεί σεβόμενη το υπόλοιπο δίκτυο. Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει τόσο συνδεδεμένο στο υπόλοιπο δίκτυο αλλά και απομονωμένα” [3]

Τα συμβατικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υποστηρίζουν μόνο τη μονόδρομη παροχή ενέργειας από τον υποσταθμό στο φορτίο. Με την ενσωμάτωση των μικροδικτύων στο σύστημα διανομής γίνεται πλέον εφικτή η αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ παραγωγής-κατανάλωσης και ο

καταναλωτής αποκτά διττή ιδιότητα. Εκτός όμως από τα πολυάριθμα οφέλη των μικροδικτύων, πιθανές είναι και μερικές ανεπιθύμητες επιπλοκές σε περιπτώσεις όπου ο σχεδιασμός λειτουργίας και ο έλεγχος των μικροδικτύων είναι ανεπαρκής. Τέτοιες επιπλοκές είναι πιθανές στη προστασία, τον έλεγχο, τη ποιότητα ισχύος, τους χρόνους εκκαθάρισης πιθανών σφαλμάτων αλλά και στην ασφάλεια του συστήματος. Συνεπώς, η λεπτομερής έρευνα και ο προσεκτικός σχεδιασμός των μικροδικτύων κρίνεται απολύτως απαραίτητος.

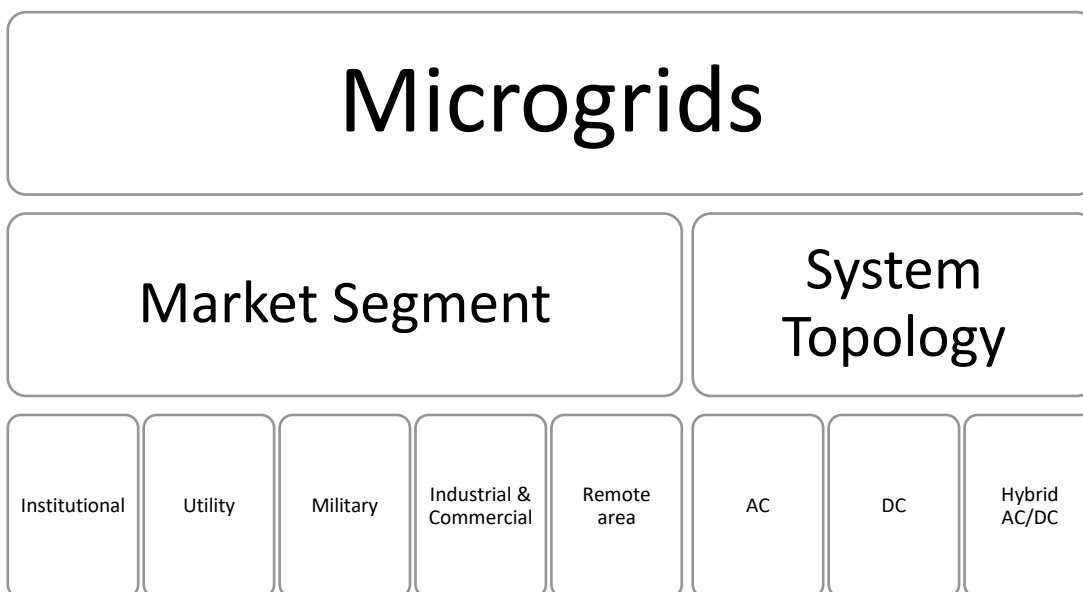
Ο συντονισμένος έλεγχος των μικροδικτύων επιτρέπει την εμφάνιση τους στο ανάντη δίκτυο ως μια ενιαία οντότητα η οποία διαθέτει ένα ανεξάρτητο αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο δεν επιβαρύνει καθόλου τα συστήματα ελέγχου του κυρίως δικτύου. Εξετάζοντας ένα μικροδίκτυο από την σκοπιά του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως μια ελεγχόμενη οντότητα η οποία δύναται να λειτουργήσει ως ένα ελεγχόμενο φορτίο ή μια πηγή ενέργειας. Επιπρόσθετα ένα μικροδίκτυο μπορεί να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο διανομής σε περιόδους ακραίων φορτίσεων. Τέλος, οι καταναλωτές που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο μικροδίκτυο είναι σε θέση να επωφεληθούν από τα υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας, τη καλύτερη ποιότητα ισχύος και να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες κάτω από οικονομικά ευνοϊκότερους όρους σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου.



Σχήμα 1-1 Η έννοια του μικροδικτύου [4]

1.3 Κατηγοριοποίηση Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αρχικά σε τρεις κατηγορίες με βάση την αρχιτεκτονική του συστήματος και τα χαρακτηριστικά της τάσης. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα AC μικροδίκτυα, τα DC μικροδίκτυα και τα υβριδικά AC/DC μικροδίκτυα. Επιπρόσθετα, τα μικροδίκτυα μπορούν να διαχωρισθούν με κριτήριο την περιοχή εφαρμογής τους όπως τα μικροδίκτυα ερευνητικού σκοπού (institutional), τα κοινοτικά μικροδίκτυα (utility), τα εμπορικά και βιομηχανικά μικροδίκτυα (commercial/industrial), τα μικροδίκτυα στρατιωτικού σκοπού (military) και τέλος τα απομονωμένα μικροδίκτυα (remote-area). Η ταξινόμηση με βάση το κάθε κριτήριο απεικονίζεται στο Σχήμα 1-2.[5], [6]



Σχήμα 1-2 Κατηγορίες Μικροδικτύων

AC Μικροδίκτυα

Τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούν τη πιο συνηθισμένη μορφή μικροδικτύων. Με την βοήθεια των μετατροπέων ισχύος διάφορα είδη διεσπαρμένων πηγών ενέργειας όπως αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκοί σταθμοί, κυψέλες καυσίμου ενσωματώνονται στο δίκτυο. Εκτός ελαχίστων περιπτώσεων το συμβατικό δίκτυο λειτουργεί με εναλλασσόμενη τάση, συνεπώς οι απαραίτητες μετατροπές στα AC μικροδίκτυα προκειμένου να ενσωματωθούν στο κυρίως σύστημα είναι ελάχιστες. Τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος συνδέονται ως επι το πλείστο στο δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης όπου μπορούν να βελτιώσουν την ροή ισχύος στο δίκτυο διανομής και να μειώσουν τις απώλειες στο δίκτυο μεταφοράς. Απαραίτητος για την εύρυθμη λειτουργία των μικροδικτύων και την ομαλή αλληλεπίδραση με το ανάντη δίκτυο είναι

ο σωστός έλεγχος έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος, η ποιότητα της ισχύος και ο συγχρονισμός των διαφόρων διεσπαρμένων πηγών ενέργειας.

DC Μικροδίκτυα

Η τεχνολογική πρόοδος που παρατηρείται στα ηλεκτρονικά ισχύος άνοιξε το δρόμο στα DC φορτία και τους μετατροπείς ισχύος να συμμετάσχουν δε διάφορες εφαρμογές. Ακόμη, διεσπαρμένες πηγές συνεχούς ρεύματος και διάφορα είδη συσκευών αποθήκευσης ενέργειας δημιουργούν νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη DC μικροδικτύων. Σήμερα κατά μέσο όρο ποσοστό 30% την εναλλασσόμενης ενέργειας τυγχάνει επεξεργασίας από μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος πριν από την αξιοποίηση της. Τέλος, τα πλεονεκτήματα που συναντά κανείς αξιοποιώντας την τεχνολογία των μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος είναι η απουσία αέργου ισχύος και ο περιορισμός των σταδίων μετατροπής της ενέργειας.

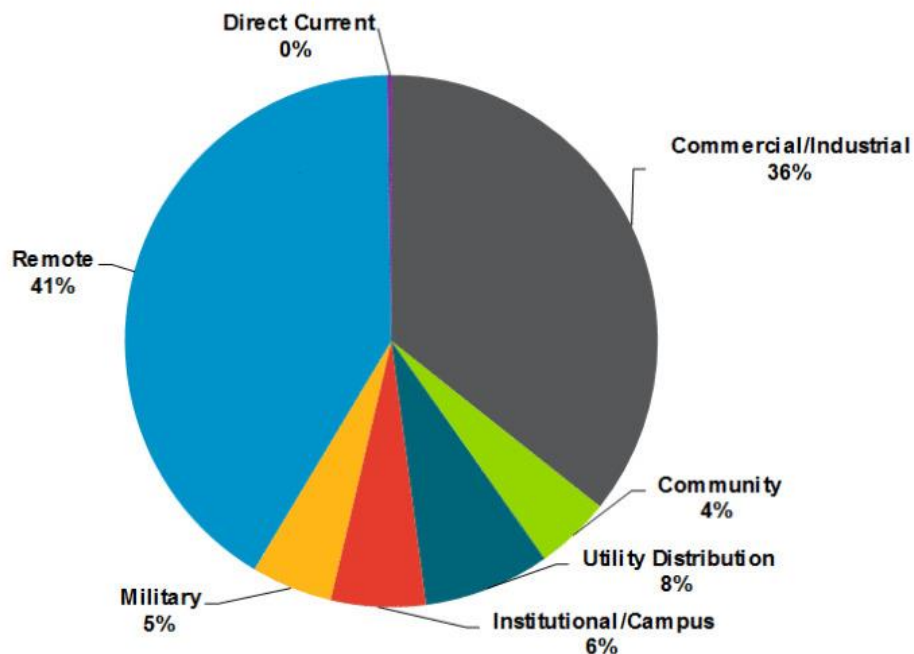
Υβριδικά AC/DC μικροδίκτυα

Ο συνδυασμός των μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργεί τα μικροδίκτυα υβριδικού τύπου. Αυτός ο τύπος μικροδικτύου στοχεύει την εκμετάλλευση αμφοτέρων των πλεονεκτημάτων του κάθε είδους, όπως για παράδειγμα την αυξημένη αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και την οικονομική λειτουργία. Τα υβριδικά μικροδίκτυα ενσωματώνουν απευθείας στο υπάρχον δίκτυο τις AC και DC διεσπαρμένες πηγές ενέργειας, τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και τα DC φορτία. Τα μικροδίκτυα αυτού του τύπου αποτελούν τη λύση για τις DC καταναλώσεις σε οικιακές αλλά και εμπορικές εφαρμογές αφού μειώνουν τις απαιτούμενες μετατροπές ενέργειας οι οποίες είναι δαπανηρές σε απώλειες. Επιπρόσθετα οι ενδεχόμενες απώλειες ενέργειας ενός ανορθωτή τάσης είναι σημαντικά μειωμένες σε σύγκριση με τις απώλειες ενός αντιστροφέα. Τέλος τα υβριδικά μικροδίκτυα αποτελούν μια ενδιαφέρουσα πρόκληση αφού ο συντονισμένος έλεγχος των μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος καθιστά την εφαρμογή ιδιαίτερα πολύπλοκη. Η διακοπτόμενη παροχή ενέργειας, η αντιστάθμιση της αέργου ισχύος και οι διασυνδεδεμένοι μετατροπείς είναι μερικές από τις προκλήσεις που προσελκύουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα των υβριδικών μικροδικτύων.

Κατηγορίες Μικροδικτύων με βάση τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται:

- Τα **εμπορικά και βιομηχανικά** μικροδίκτυα αναπτύσσονται με σκοπό την ασφαλή και αξιόπιστη παροχή ισχύος αφού μια πιθανή διακοπή ρεύματος σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις μπορεί να προκαλέσει σημαντική απώλεια εσόδων και χρονοβόρες διαδικασίες επανεκκίνησης.
- Τα **κοινοτικά μικροδίκτυα** συμβάλουν στην αξιοποίηση της τοπικά παραγόμενης ενέργειας και μπορούν να εξυπηρετήσουν χιλιάδες χρήστες. Σε ένα κοινοτικό μικροδίκτυο οι καταναλωτές μπορούν να παράγουν ενέργεια από ΑΠΕ και να εμπορεύονται την ενέργεια αυτή με άλλους χρήστες.

- Τα **απομακρυσμένα μικροδίκτυα** αποτελούν την πιο συνηθισμένη κατηγορία μικροδικτύων. Συναντώνται σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση στο κυρίως δίκτυο δεν είναι εφικτή. Λειτουργούν αποκλειστικά σε απομονωμένη λειτουργία, ελαχιστοποιούν την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και μεγιστοποιούν την χρήση των ΑΠΕ.
- Τα **μικροδίκτυα ακαδημαϊκού σκοπού** συνήθως συγκεντρώνουν την ήδη υπάρχουσα παραγωγή για να εξυπηρετήσουν διάφορα φορτία τοποθετημένα σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή έτσι ώστε η διαχείριση να είναι ευκολότερη.
- Τα **μικροδίκτυα στρατιωτικού σκοπού** αναπτύχθηκαν με σκοπό την αδιάλειπτη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στρατιωτικών εγκαταστάσεων. Αυτού του τύπου τα μικροδίκτυα λειτουργούν ανεξάρτητα από το εκάστοτε εθνικό δίκτυο και η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από ορυκτά καύσιμα.



Γράφημα 1-2 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Μικροδικτύων ανά τομέα εφαρμογής 2019 [Navigant Research]

Η ανάγκη για μεταφορά ενέργειας σε δυσπρόσιτες περιοχές χωρίς δυνατότητα ηλεκτροδότησης κατευθύνει το ερευνητικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη αυτόνομων ενεργειακών κοινοτήτων και έτσι γεννιέται σιγά σιγά η έννοια των μικροδικτύων. Σύμφωνα την Navigant Research το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύς σε μικροδίκτυα που εμπίπτει στην κατηγορίας των απομονωμένων μικροδικτύων ανέρχεται στο 41% του συνόλου. Σε δεύτερη φάση, η τεχνολογία των μικροδικτύων εισέρχεται στο βιομηχανικό τομέα με σκοπό να προσφέρει υποστήριξη στα παραδοσιακά

συστήματα που πλήττονται από συχνές διακοπές ενέργειας. Έτσι τα μικροδίκτυα εμπορικού/βιομηχανικού σκοπού κατέχουν 36% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε μικροδίκτυα. Το υπόλοιπο μερίδιο ισχύος καλύπτεται από τα μικροδίκτυα εκπαιδευτικού, κοινωνικού και στρατιωτικού σκοπού κατά το παραπάνω γράφημα.

1.4 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Τα μικροδίκτυα αποτελούν τον απαραίτητο συνδετικό κρίκο μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές ενέργειας και του υπάρχοντος συστήματος. Παρέχουν την αναγκαία πλατφόρμα ένταξης διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, εξοπλισμού αποθήκευσης και μετατροπών ισχύος με ένα πιο βιώσιμο αποτύπωμα. Ωστόσο, τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα συνοδεύονται από σημαντικές προκλήσεις στο τομέα της ευστάθειας, της προστασίας και της αξιοπιστίας των συστημάτων.

1.4.1 Πλεονεκτήματα

Η εισαγωγή των μικροδικτύων στο τομέα της ενέργειας παρέχει σημαντικά οφέλη έναντι των συμβατικών δικτύων. Τα συνολικά οφέλη που μπορεί να παρέχουν τα μικροδίκτυα στα παραδοσιακά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατατάσσουμε τα οφέλη αυτά σε τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά.

Ξεκινώντας από τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων στον **τεχνικό τομέα** έχουμε :

- Με την αξιοποίηση διαφόρων διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων παρατηρούνται σημαντικά μειωμένες απώλειες μεταφοράς αφού η παραγωγή ενέργειας γίνεται τοπικά. Η παραγωγή ενέργειας έρχεται πιο κοντά στα σημεία κατανάλωσης και συνεπώς τα ποσά ενέργειας που πρέπει να μεταφερθούν μειώνονται.
- Προσφορά επικουρικών υπηρεσιών στο ανάντη δίκτυο σε περιπτώσεις αιχμής αποτρέποντας την κατάρρευση του αφού μπορεί να λειτουργήσει σαν ένα ελεγχόμενο φορτίο αλλά και ως μία ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής. Ακόμη, μπορεί να συνεισφέρει στη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου.
- Αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με την ευρύτερη αξιοποίηση εφαρμογών συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Η σημαντική ανάπτυξη των εφαρμογών αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι με τα μικροδίκτυα επιτυγχάνεται αποκέντρωση της παραγωγής και πλέον μεγάλες μονάδες ΣΗΘΥΑ εγκαθίστανται κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Η αύξηση της απόδοσης του συστήματος οδηγεί σε μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων για τις ανάγκες της ηλεκτροπαραγωγής.

- Το σύστημα αποκτά μεγαλύτερη ευελιξία αλλά και αυξημένη αξιοπιστία αφού τα ελεγχόμενα φορτία στην πλευρά της κατανάλωσης παρέχουν σημαντικές διευκολύνσεις στην πλευρά της παραγωγής όταν αυτό κριθεί αναγκαίο.
- Υποβοήθηση της βιώσιμης λειτουργίας του τοπικού δικτύου αλλά και βελτίωση της συνολικής ποιότητας του συστήματος.

Πλεονεκτήματα οικονομικής φύσεως :

- Μείωση συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας με την ενσωμάτωση πολυάριθμων μονάδων plug and play. Οι απώλειες ενέργειας τόσο κατά την μεταφορά όσο και κατά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας ελαχιστοποιούνται αφού μεγάλο μέρος της ενέργειας παράγεται στο σημείο όπου καταναλώνεται. Επιπρόσθετα, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου μεταφοράς μειώνεται παράλληλα.
- Με την χρήση των μικροδικτύων επιτυγχάνεται η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας στον απλό χρήστη του δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι το τέλος της κυριαρχίας των μεγάλων εταιρειών παραγωγής ενέργειας και η επακόλουθη μείωση στη τιμή αλλά και το κόστος διανομής της ενέργειας.
- Ολοένα και περισσότεροι καταναλωτές αποκτούν την δυνατότητα να επωφεληθούν από τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με τις μονάδες αυτές να εγκαθίστανται κοντά στο καταναλωτή.
- Βελτιστοποίηση του κόστους ενέργειας με την αξιοποίηση της ενεργειακής ευελιξίας που παρέχει το μικροδίκτυο.

Σημαντική κρίνεται επίσης η συμβολή των μικροδικτύων στην προστασία του **περιβάλλοντος** από τα διάφορα ρυπογόνα απόβλητα των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων. Κάποια από αυτά είναι τα εξής :

- Μειωμένη εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα αφού με την ενσωμάτωση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων.
- Η διεύθυνση των ΑΠΕ υπό το πλαίσιο ενός μικροδικτύου αποτρέπει την δέσμευση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων αποκλειστικά για εγκαταστάσεις ΑΠΕ.
- Μείωση του όγκου του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι χρήστες του δικτύου ενδέχεται να ευαισθητοποιηθούν όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος αφού πλέον οι μονάδες παραγωγής δεν θα εγκαθίστανται σε απομονωμένες περιοχές μακριά από τους καταναλωτές.

1.4.2 Προκλήσεις

Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης εκμετάλλευση των διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ δεν θα επηρεάσει την αξιοπιστία του δικτύου. Η ευρεία χρησιμοποίηση των μικροδικτύων αντιμετωπίζει ακόμα σημαντικές προκλήσεις στους ακόλουθους τομείς [7]:

Αμφίδρομη ροή ισχύος: Η διττή ιδιότητα που αποκτούν οι χρήστες του συστήματος διανομής και διασύνδεση κατανεμημένων μονάδων παραγωγής στο σύστημα χαμηλής τάσης δημιουργούν αντίθετες ροές ισχύος οι οποίες καθιστούν το συντονισμό των συστημάτων προστασίας ιδιαίτερα πολύπλοκο. Επιπρόσθετα η αμφίδρομη ροή ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα ελέγχου της τάσης.

Προβλήματα ευστάθειας: Πολλές φορές οι ενέργειες εναλλαγής της λειτουργίας του μικροδικτύου από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη και το αντίθετο μπορούν να θέσουν ολόκληρο το σύστημα σε μεταβατική ευστάθεια. Επιπρόσθετα κατά το συντονισμό όλων των διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων δύναται να προκληθούν τοπικές ταλαντώσεις από το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου.

Αβεβαιότητα: Ο παράγοντας της αβεβαιότητας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την λειτουργία των μικροδικτύων. Οι καιρικές συνθήκες και το προφίλ φορτίου είναι οι δύο σημαντικότερες αβεβαιότητες που καλείται το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου να αντιμετωπίσει έτσι ώστε να επιτευχθεί οικονομική και αξιόπιστη λειτουργία. Η αυξημένη αβεβαιότητα σε σχέση με τα συμβατικά ηλεκτρικά δίκτυα οφείλεται στο μειωμένο αριθμό των φορτίων και στις συσχετισμένες διακυμάνσεις των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων.

Χαμηλή αδράνεια: Η αντικατάσταση του μεγάλου αριθμού σύγχρονων γεννητριών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδηγεί σε μειωμένη στρεφόμενη εφεδρεία. Η στρεφόμενη εφεδρεία ή αλλιώς αδράνεια του συστήματος είναι απαραίτητη για τη ρύθμιση της συχνότητας. Οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν στη συχνότητα του δικτύου και αποσβένουν φυσικά τις διακυμάνσεις της συχνότητας. Η μειωμένη αδράνεια που παρατηρείται στα μικροδίκτυα αντιμετωπίζεται με την ανάπτυξη ηλεκτρονικών ισχύος τα οποία μιμούνται την συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών και παρέχουν εικονική αδράνεια στο μικροδίκτυο.

Σχεδιασμός: Πρόκληση επίσης αποτελεί και η ανάπτυξη νέων μικροδικτύων αφού πολλά χαρακτηριστικά των παραδοσιακών δικτύων δεν ανταποκρίνονται στις νέες απαιτήσεις των σύγχρονων μικροδικτύων. Οι επαγωγικές γραμμές μεταφοράς, τα διάφορα φορτία σταθερής ισχύος και η κυριαρχία των τριών φάσεων θα πρέπει να επανεξεταστούν στην περίπτωση των μικροδικτύων.

1.5 Έλεγχος

Η διαφορά μεταξύ των συμβατικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και των μικροδικτύων έγκειται στο γεγονός ότι τα συμβατικά δίκτυα περιορίζονται αποκλειστικά στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ τα μικροδίκτυα μαζί με την ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρουν σημαντικές πληροφορίες που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα αποδοτικότερο και πιο ευέλικτο σύστημα. Η σωστή διαχείριση όμως του τεράστιου αυτού όγκου πληροφορίας προϋποθέτει την ύπαρξη καλά μελετημένων και ικανών συστημάτων ελέγχου. Στόχος αυτών των έξυπνων συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου είναι η εύρυθμη και όσο το δυνατόν πιο αποδοτική λειτουργία των μικροδικτύων.

Μερικές από τις εν λόγω πληροφορίες που τροφοδοτούν τα αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου των μικροδικτύων είναι οι εξής:

- Δυνατότητα παραγωγής των ενταγμένων στο σύστημα ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πλαίσια κ.α.)
- Διατιμήσεις ανάλογα με την ώρα αλλά και τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες
- Αιχμές κατανάλωσης
- Αιχμές παραγωγής
- Κατάσταση φόρτισης συστημάτων αποθήκευσης

Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες, το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου λαμβάνει τις διάφορες αποφάσεις που αφορούν την λειτουργία του, για παράδειγμα τη φόρτιση των διαφόρων μονάδων αποθήκευσης όταν παρατηρείται περίσσεια ισχύος ή σε αντίθετη περίπτωση τη τροφοδότηση του δικτύου από την ήδη υπάρχουσα αποθηκευμένη ενέργεια λόγω ανεπάρκειας παραγόμενης ισχύος. Τέλος, βάση αυτών των πληροφοριών κρίνεται η διασυνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου ή η νησιδοποίηση του.

Σχήμα ελέγχου Μικροδικτύων

Το σχήμα ελέγχου των μικροδικτύων απαρτίζεται από τρία ξεχωριστά επίπεδα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως ιεραρχικός έλεγχος. Τα τρία αυτά επίπεδα ελέγχου ονομάζονται πρωτεύον, δευτερεύον και τριτεύον έλεγχος [6], [7].

I. Πρωτεύον Έλεγχος

Το πρώτο στάδιο του σχήματος ελέγχου των μικροδικτύων αποτελεί και την ταχύτερη αντίδραση του συνολικού συστήματος ελέγχου. Το στάδιο αυτό του ελέγχου είναι επίσης γνωστό ως εσωτερικός ή τοπικός έλεγχος. Οι αποφάσεις ελέγχου σε αυτό το στάδιο λαμβάνονται αξιολογώντας τοπικές μετρήσεις χωρίς να απαιτείται κάποια εξωτερική επικοινωνία. Κύριες λειτουργίες σε αυτό το στάδιο ελέγχου είναι :

- διατήρηση τάσης και συχνότητας εντός των επιτρεπτών ορίων
- διακίνηση ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων σε παράλληλη λειτουργία
- εξασφάλιση των λειτουργιών plug and play

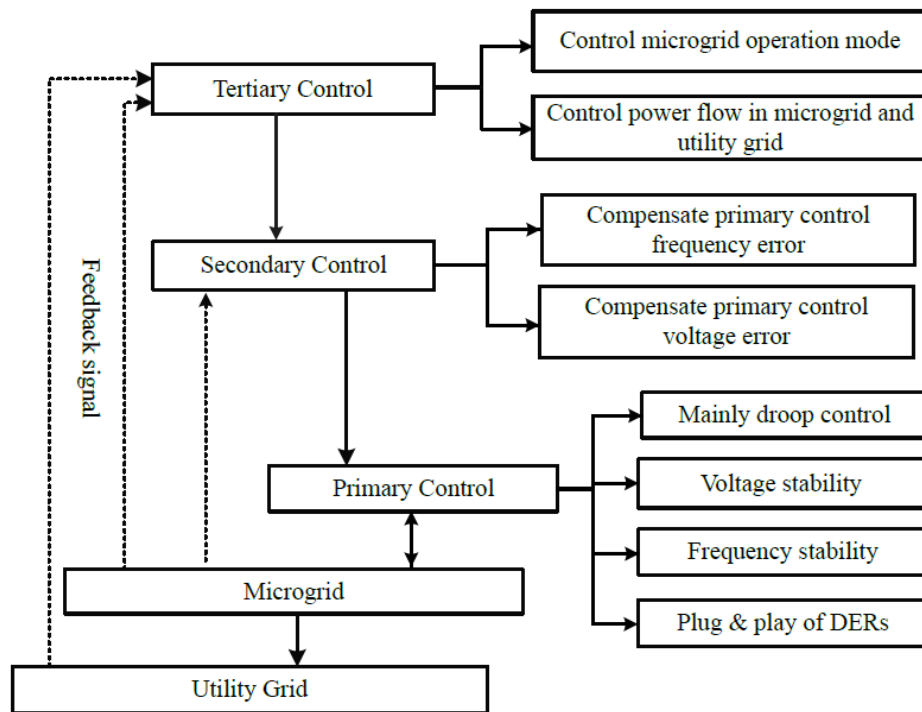
Επιπρόσθετα ο πρωτεύον έλεγχος είναι υπεύθυνος για την ομαλή μετάβαση του μικροδικτύου σε λειτουργία νησιδοποίησης αλλά και το αντίθετο αφού πιθανή ασυμφωνία παραγωγής και κατανάλωσης μπορεί να φέρει το μικροδίκτυο σε αστάθεια.

II. Δευτερεύον Έλεγχος

Ο δευτερεύον έλεγχος είναι υπεύθυνος για την διαχείριση της ενέργειας στο μικροδίκτυο και την διασφάλιση της οικονομικής και αξιόπιστης λειτουργίας του μικροδικτύου τόσο σε διασυνδεδεμένη λειτουργία όσο και σε απομονωμένη. Το κομμάτι αυτό του ελέγχου γίνεται ιδιαίτερα απαιτητικό στα απομονωμένα μικροδίκτυα όπου οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας είναι σημαντικά υψηλές. Αντικείμενο του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η βέλτιστη ένταξη των μονάδων και η αξιοποίηση των διαθέσιμων διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων με γνώμονα την επίτευξη του επιλεγμένου στόχου. Ακόμη, ο δευτερεύον έλεγχος είναι υπεύθυνος για την εκκαθάριση των εναπομεινάντων μόνιμων μεταβολών σε συχνότητα και τάση από τη πρώτη φάση ελέγχου. Το στάδιο αυτό του ελέγχου είναι πιο αργό από το πρωτεύον έλεγχο αφού απαιτεί επικοινωνία με το διάφορους ελεγκτές. Τα σχήματα δευτερεύοντος ελέγχου διαχωρίζονται σε συγκεντρωμένα και αποκεντρωμένα συστήματα. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος μικρής κλίμακας ενώ τα αποκεντρωμένα συστήματα είναι προτιμότερα σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας.

III. Τριτεύον έλεγχος

Αποτελεί το υψηλότερο στάδιο ελέγχου και έχει στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων που θέτει το κυρίως δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένο το μικροδίκτυο. Ο τριτεύον έλεγχος είναι υπεύθυνος για το συντονισμό της λειτουργίας πολλαπλών μικροδικτύων τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και για την επικοινωνία με το κύριο δίκτυο. Όταν το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο αρμοδιότητα της τρίτης φάσης ελέγχου είναι και η διαχείριση της ροής ισχύος από και προς το ανάντη δίκτυο. Αυτό το στάδιο ολοκληρώνεται συνήθως εντός μερικών λεπτών και παρέχει τα απαραίτητα σήματα για τον δευτερεύον έλεγχο των μικροδικτύων και άλλων υποσυστημάτων που απαρτίζουν ολόκληρο το δίκτυο.



Σχήμα 1-3 Ιεραρχία Ελέγχου στα μικροδίκτυα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στο να εφοδιάσει τον αναγνώστη με τις απαραίτητες γνώσεις που αφορούν τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό γίνεται αρχικά μια αναφορά στο ευρωπαϊκό μοντέλο στόχο (target model) και στην ευρωπαϊκή στρατηγική για την ενέργεια. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι φορείς και οι συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφεται ο διαχωρισμός της αγοράς ενέργειας στις επιμέρους αγορές και εξηγείται ο ρόλος τους. Επιπρόσθετα, αναλύεται το πρόβλημα του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού το οποίο και αποτελεί το πλαίσιο λειτουργίας της αγοράς. Όσον αφορά τον ΗΕΠ εξηγείται ο στόχος, οι περιορισμοί αλλά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του.

2.2 Ευρωπαϊκή στρατηγική για την ενέργεια

Η φιλελευθεροποίηση και η δημιουργία μιας ενιαίας ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αποτέλεσε έναν από τους βασικούς πυλώνες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο των ευρύτερων αλλαγών στον τομέα της ενέργειας που λαμβάνουν χώρα από το 1996.

Η εγκατάλειψη των κάθετα ολοκληρωμένων μονοπωλίων ενέργειας και η δημιουργία μιας απελευθερωμένης αγοράς αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς ενέργειας, την αποδοτικότερη παραγωγή, τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και την ενίσχυση της ασφάλειας εφοδιασμού. Επιπρόσθετα, μια φιλελευθεροποιημένη αγορά ενέργειας προάγει την ανταγωνιστικότητα και την διαφάνεια προς όφελος όλων των συμμετεχόντων.

Η συζήτηση για την αναδιάρθρωση των ευρωπαϊκών αγορών ενέργειας ξεκινά με την Οδηγία 96/92/ΕΚ [8] του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου που αναφέρεται στους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη οδηγία αποτέλεσε το βασικό νομοθετικό πλαίσιο που εισήγαγε τη διαδικασία απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και άνοιξε το δρόμο για την ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τη πρώτη ευρωπαϊκή οδηγία έρχεται να συμπληρώσει η έκδοση της δεύτερης δέσμης μέτρων-Οδηγία 2003/54/ΕΚ [9], η οποία αποσκοπεί στην πλήρη απελευθέρωση των αγορών θέτοντας σε ισχύ ένα νέο κοινό θεσμικό πλαίσιο για όλα τα κράτη μέλη.

Περισσότερες μεταρρυθμίσεις στις αγορές ενέργειας φέρνει η τρίτη ενεργειακή δέσμη που υιοθετήθηκε το 2009, περιλαμβάνει την Οδηγία 2009/72/ΕΚ [10], έχει στόχο την επιτάχυνση των επενδύσεων στις υποδομές για διάφορες διακρατικές διασυνδέσεις αλλά και την περαιτέρω

διείσδυση των ΑΠΕ στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριες μεταρρυθμίσεις που έφερε η τρίτη ενεργειακή δέσμη είναι ο διαχωρισμός της παραγωγής από τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, ορίζοντας ένα ανεξάρτητο διαχειριστή για το σύστημα μεταφοράς. Ακόμη, το κεφάλαιο 9 της οδηγίας 2009/72/ΕΚ προτρέπει την κάθε χώρα να ορίσει μία εθνική ρυθμιστική αρχή ενέργειας και δημιουργεί με το Κανονισμό 713/2009 [11] τον Οργανισμό για την Συνεργασία των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας ΟΣΠΑΕ (Agency for the Cooperation of Energy Regulators- ACER). Ο ΟΣΠΑΕ με τη σειρά του προτείνει ένα ενιαίο Ευρωπαϊκό μοντέλο αγοράς γνωστό ως μοντέλο στόχο (Target Model) και αναλαμβάνει ένα συντονιστικό ρόλο, βοηθώντας έτσι στον καταμερισμό της δυναμικότητας των διασυνδέσεων. Στο πλαίσιο της τρίτης ενεργειακής δέσμης ιδρύεται επίσης το Ευρωπαϊκό Δίκτυο των Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ENTSO-E που σε συνεργασία με τον ΟΣΠΑΕ διασαφηνίζουν τους κανόνες για τις διασυννοριακές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας και για τη λειτουργία των χονδρεμπορικών αγορών.

Σήμερα η Ευρωπαϊκή Αγορά Ενέργειας αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις όπως οι αυξημένες ανάγκες σε ενέργεια, οι υψηλές και ασταθείς τιμές, η αυξανόμενη απειλή της κλιματικής αλλαγής και η μεγάλη εξάρτηση από εισαγόμενους ενεργειακούς πόρους. Ακόμη μια πρόκληση αποτελεί η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ και η ανάγκη για περεταίρω διαφάνεια και διασύνδεση των αγορών ενέργειας. Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προκλήσεων οι πέντε κύριοι μελλοντικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής είναι οι εξής [12]:

- I. Σταδιακή απανθρακοποίηση της οικονομίας σύμφωνα με την συνθήκη του Παρισιού
- II. Προώθηση έρευνας στους τομείς της καθαρής ενέργειας, προτεραιότητα στην έρευνα και τις καινοτομίες με σκοπό την ενεργειακή μετάβαση και την βελτίωση του ανταγωνισμού.
- III. Ποικιλία ενεργειακών πόρων η οποία θα εγγυάται ενεργειακή ασφάλεια διαμέσου αλληλεγγύης και συνεργασίας μεταξύ των κρατών μελών.
- IV. Διασφάλιση μιας πλήρους λειτουργικής ευρωπαϊκής αγοράς ενέργειας με ελεύθερη ροή ισχύος εντός της ευρωζώνης.
- V. Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενους ενεργειακούς πόρους

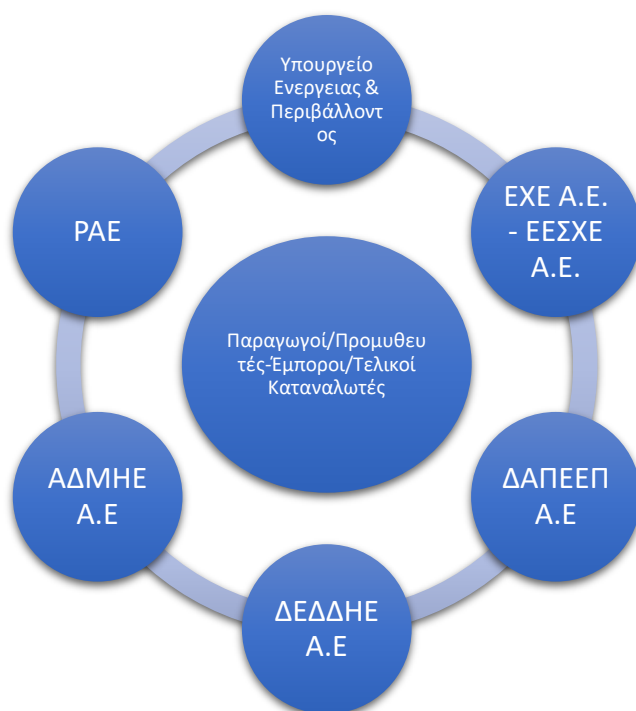
2.3 Μοντέλο Ελληνικής Αγοράς Ενέργειας

Το μοντέλο της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί πλήρως το ευρωπαϊκό προτεινόμενο μοντέλο. Η υιοθέτηση του ευρωπαϊκού Target Model οδηγεί σε μια σειρά θετικών επιδράσεων όπως η περαιτέρω διείσδυση τεχνολογιών ΑΠΕ, η βελτίωση της ασφάλειας εφοδιασμού, η σύγκλιση τιμών και ο αυξημένος ανταγωνισμός τόσο σε εθνικό όσο και σε υπερεθνικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, η λειτουργία των αγορών κάτω από ένα κοινό πλαίσιο κανονισμών ενισχύει σημαντικά τις διασυννοριακές συνεργασίες, δημιουργεί κλίμα εμπιστοσύνης μεταξύ των συμμετεχόντων και παρέχει εύφορο έδαφος τη μεταφορά τεχνογνωσίας.

2.3.1 Φορείς και συμμετέχοντες της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στο πλαίσιο μιας φιλελευθεροποιημένης αγοράς ενέργειας προάγεται η ανταγωνιστικότητα προσελκύοντας νέους συμμετέχοντες στην αγορά. Συνοπτικά οι συμμετέχοντες αυτοί μπορεί να είναι παραγωγοί, προμηθευτές, έμποροι, παραγωγοί ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ, Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης ΑΠΕ (Φο.ΣΕ), αυτοπρομηθευόμενοι πελάτες και καταναλωτές. Δικαίωμα συμμετοχής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας κατέχουν επίσης ο Διαχειριστής του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) και ο Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης [13]. Η κάθε συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας εξυπηρετεί τα προσωπικά της συμφέροντα. Για παράδειγμα, μια συμμετοχή από πλευράς παραγωγής αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση των εσόδων της από τη πώληση ενέργειας ενώ αντίθετα μια συμμετοχή στην πλευρά της κατανάλωσης αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους αγοράς ενέργειας. Προκειμένου λοιπόν αυτός ο ανταγωνισμός να λειτουργεί προς όφελος των πολιτών, κρίνεται απαραίτητο ένα ρυθμιστικό πλαίσιο το οποίο θα εφαρμόζεται τους οργανωτικούς φορείς της αγοράς.

Για την εύρυθμη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας φροντίζουν διάφοροι οργανωτικοί συμμετέχοντες όπως ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς (ΑΔΜΗΕ), ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής (ΔΕΔΔΗΕ), η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (ΕΧΕ) και η Εταιρία Εκκαθάρισης Συναλλαγών Χρηματιστηρίου Ενέργειας (ΕΕΣΧΕ). Φορείς και συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αλληλεπιδρούν με στόχο το κοινωνικό όφελος κάτω από την ομπρέλα του Υπουργείου Ενέργειας & Περιβάλλοντος.



Σχήμα 2-1 Φορείς και Συμμετέχοντες Ελληνικής Αγοράς Ενέργειας

- **Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)**

Η ΡΑΕ αποτελεί μια ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο η οποία συστάθηκε βάσει του Νόμου 2773/1999 [14] στο πλαίσιο της εναρμόνισης της ελληνικής αγοράς ενέργειας με τις ευρωπαϊκές οδηγίες. Κύρια αρμοδιότητα της είναι η εποπτεία της εγχώριας αγοράς ενέργειας σε όλους τους τομείς της. Σκοπός της σύστασης της είναι η απελευθέρωση της αγοράς φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοπτικά οι αρμοδιότητες της ΡΑΕ όπως ορίζονται από το κεφάλαιο Γ' (Αρμοδιότητες της ΡΑΕ), του Α' μέρους του ενεργειακού νόμου 4001/2011 [15] είναι οι εξής :

- Ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού
- Χορήγηση των απαραίτητων αδειών για την άσκηση ενεργειακών δραστηριοτήτων
- Ανάπτυξη υποδομών και παρακολούθηση προγράμματος ανάπτυξης
- Εποπτεία επι των Ανεξάρτητων Διαχειριστών Μεταφοράς και Διανομής
- Πιστοποίηση Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς
- Έγκριση τιμολογίων μη ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων
- Χορήγηση εξαιρέσης από τις υποχρεώσεις παροχής πρόσβασης τρίτων
- Θέσπιση, παρακολούθηση και εποπτεία της εφαρμογής των κανόνων πρόσβασης στις διασυνδέσεις
- Παρακολούθηση και εποπτεία της αγοράς ενέργειας
- Λήψη ρυθμιστικών μέτρων για την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών αγορών
- Προστασία των καταναλωτών

Επιπρόσθετα η ΡΑΕ ορίζεται ως αρμόδιος οργανισμός για την συνεργασία με τις αντίστοιχες ρυθμιστικές αρχές άλλων κρατών με γνώμονα την ανάπτυξη της εσωτερικής αγοράς ενέργειας. Στόχος αυτής της περιφερειακής συνεργασίας είναι η ανάπτυξη ενός εναρμονισμένου ρυθμιστικού πλαισίου, η ενίσχυση της ασφάλειας του εφοδιασμού, η προστασία των πελατών, η προστασία του περιβάλλοντος και η ενίσχυση του υγιούς ανταγωνισμού. Τέλος, η ΡΑΕ οφείλει να συνεργάζεται στενά με την εγχώρια επιτροπή ανταγωνισμού για την διασφάλιση του δίκαιου ανταγωνισμού[16], [17].

- **Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ)**

Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο μεταξύ παραγωγής και διανομής ενέργειας, είτε αυτή παράγεται από εγχώριες μονάδες είτε εγχέεται στο δίκτυο μέσω διακρατικών διασυνδέσεων. Ο ΑΔΜΗΕ συστάθηκε από το Νόμο 4001/2011 [15] και λειτουργεί ως ανεξάρτητος διαχειριστής εναρμονισμένος με τις ισχύουσες ευρωπαϊκές οδηγίες. Η εταιρεία ασκεί τις αρμοδιότητες και εκτελεί τα καθήκοντα του κυρίου και διαχειριστή του ΕΣΜΗΕ. Ο ΑΔΜΗΕ διαχειρίζεται το ΕΣΜΗΕ με βάση το Κώδικα Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας ο οποίος καταρτίζεται από την ίδια την εταιρεία και υποβάλλεται στη ΡΑΕ [18].

Ο κώδικας αυτός πιστοποιεί τον ΑΔΜΗΕ ως ανεξάρτητο διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς διαχωρισμένης ιδιοκτησίας (Ownership Unbundling)[10].

Σκοπός της εταιρείας είναι η λειτουργία, ο έλεγχος, η συντήρηση και η ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια, με τρόπο επαρκή, ασφαλή, αποδοτικό και αξιόπιστο, προωθώντας την ανάπτυξη του ελεύθερου ανταγωνισμού και την εξασφάλιση της ισότιμης μεταχείρισης όλων των χρηστών του ΕΣΜΗΕ. Επιπρόσθετα, αρμοδιότητα της εταιρείας αποτελεί η λειτουργία της Αγοράς Εξισορρόπησης και του διασυνοριακού εμπορίου σύμφωνα με τις αρχές της διαφάνειας, της ισότητας και του ελεύθερου ανταγωνισμού[19].

- **Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ)**

Οι καταναλωτές χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια διαμέσου του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ). Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) είναι ο αποκλειστικός υπεύθυνος για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου διανομής. Ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε συστάθηκε έτσι ώστε η ελληνική αγορά ενέργειας να εναρμονιστεί με τις ευρωπαϊκές οδηγίες που αναφέρονται στους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας[10].

Βάσει του Νόμου 4001/2011, ο οποίος ενσωματώνει τις ευρωπαϊκές οδηγίες στην ελληνική νομοθεσία, ανατίθενται στον ΔΕΔΔΗΕ η διαχείριση του ΕΔΔΗΕ αλλά και η διαχείριση των αγορών των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών.

Οι αρμοδιότητες του ΔΕΔΔΗΕ όσον αφορά τη διαχείριση του ΕΔΔΗΕ είναι οι εξής [20] :

- Ανάπτυξη, λειτουργία και συντήρηση του ΕΔΔΗΕ
- Διασφάλιση της αξιόπιστης και ασφαλούς λειτουργίας του ΕΔΔΗΕ
- Διασφάλιση μακροπρόθεσμης ικανότητας του ΕΔΔΗΕ να ανταποκρίνεται στις εύλογες ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια

Οι αρμοδιότητες του ΔΕΔΔΗΕ όσον αφορά τα Μη Διασυνδεδεμένα νησιά είναι οι εξής [21]:

- Διαχείριση της παραγωγής
- Λειτουργία αγοράς και των συστημάτων των νησιών

Η εκπλήρωση όλων των αρμοδιοτήτων του ΔΕΔΔΗΕ οφείλει να γίνεται με τη δέουσα μέριμνα για το περιβάλλον και την ενεργειακή αποδοτικότητα καθώς επίσης και διασφαλίζοντας την πρόσβαση των χρηστών στο ΕΔΔΗΕ με τον πλέον οικονομικό, διαφανή, άμεσο και αμερόληπτο τρόπο.

- **Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ)**

Ο ΔΑΠΕΕΠ διαχειρίζεται τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και την Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) του Διασυνδεδεμένου Συστήματος καθώς και τις Εγγυήσεις προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν παραχθεί από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ. Αποτελεί τον εκπαιστηριαστή των δικαιωμάτων ρύπων στην Ελλάδα και παράλληλα λειτουργεί ως Φορέας Συσσωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦΟΣΕ) παραγωγών ΑΠΕ. Επιπρόσθετα ο ΔΑΠΕΕΠ στοχεύει στην ενίσχυση κοινωνικής αποδοχής των ΑΠΕ, την αύξηση διείσδυσης ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ, την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη δημιουργία ασφαλούς επενδυτικού περιβάλλοντος για τις ΑΠΕ. Όλες οι λεπτομέρειες λειτουργίας του φορέα ορίζονται από το “Κώδικα Διαχειριστή ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης”[22].

Συνοπτικά οι αρμοδιότητες του ΔΑΠΕΕΠ είναι οι ακόλουθες :

- Σύναψη Συμβάσεων λειτουργικής Ενίσχυσης και Συμβάσεων Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας
- Υποβολή Προσφορών Έγχυσης για την προβλεπόμενη ποσότητα ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ, Φωτοβολταϊκά Στεγών και ΣΗΘΥΑ
- Εκπροσώπηση στις Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας των συμβεβλημένων παραγωγών
- Υπολογισμός της μηνιαίας Ειδικής Τιμής Αγοράς (ETA) ανά τεχνολογία ΑΠΕ

- **Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (ΕΧΕ) – Εταιρεία Εκκαθάρισης Συναλλαγών Χρηματιστηρίου Ενέργειας (ΕΕΣΧΕ)**

Ο Όμιλος Χρηματιστηρίου ενέργειας αποτελείται από την ΕΧΕ Α.Ε. και την ΕΣΧΕΕ Α.Ε. Η ΕΧΕ Α.Ε. ορίστηκε από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή (ΡΑΕ) ως Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΟΔΑΗΕ) για τη λειτουργία της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και της Ενδοημερήσιας Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ακόμη, μετά από την έγκριση της Επιτροπής Κεφαλαιαγοράς (την 16.03.2020) λειτουργεί την Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά ως Διαχειριστής Αγοράς Παραγώγων Ενέργειας. Η θυγατρική εταιρεία ΕΕΣΧΕΕ Α.Ε. είναι υπεύθυνη για την εκκαθάριση και το διακανονισμό των συναλλαγών της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και της Ενδοημερήσιας Αγοράς καθώς και για την εκκαθάριση των θέσεων της Αγοράς Εξισορρόπησης.

Το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας στοχεύει στη σύζευξη της ελληνικής αγοράς με τις υπόλοιπες ευρωπαϊκές αγορές και στην ενίσχυση του ανταγωνισμού και της διαφάνειας μειώνοντας το ενεργειακό κόστος και διασφαλίζοντας καλύτερες τιμές για τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις. Επιπρόσθετα προνοεί για την εξασφάλιση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα. Τέλος, προτρέπει την περαιτέρω αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ.

- **Υπουργείο Ενέργειας & Περιβάλλοντος**

Αποτελεί το αρμόδιο κρατικό όργανο κάτω από την ομπρέλα του οποίου λειτουργεί η εθνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της ενεργειακής πολιτικής του υπουργείου είναι η εξεύρεση, η εξασφάλιση και η διαχείρισης ενεργειακών πόρων, με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής, ομαλή, αδιάλειπτη και αξιόπιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας με τους καλύτερους όρους για τους πολίτες.

2.3.2 Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η τελευταία δεκαετία έφερε σημαντικές μεταρρυθμίσεις στην Ελληνική Αγορά Ενέργειας. Το Σύστημα Συναλλαγών Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού καταργείται και το μοντέλο υποχρεωτικής κοινοπραξίας (Mandatory Pool) που ακολουθούσε η μέχρι πρότινος αγορά καταργείται. Όλες οι συναλλαγές ενέργειας που αφορούν το διασυνδεδεμένο σύστημα διενεργούνται πλέον στις εξής τέσσερις αγορές : Χρηματοπιστωτική Αγορά, Αγορά Επόμενης Μέρας , Ενδοημερήσια Αγορά και Αγορά Εξισορρόπησης. Η λειτουργία της Ενδοημερήσιας Αγοράς, της Αγοράς Επόμενης Μέρας και της Χρηματοπιστωτικής Αγοράς διενεργείται από το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας σε συνεργασία με τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς και τους αρμόδιους φορείς. Για την Αγορά Εξισορρόπησης υπεύθυνος είναι ο διαχειριστής του ΕΣΜΗΕ (ΑΔΜΗΕ Α.Ε.). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ως ημέρα έναρξης λειτουργίας των αγορών ορίσθηκε η 1^η Νοεμβρίου 2020 σύμφωνα με τη σχετική απόφαση της ΡΑΕ.

Ακολουθούν περισσότερες πληροφορίες για τη λειτουργία της κάθε αγοράς ξεχωριστά:

1. Χρηματοπιστωτική Αγορά

Η Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά ή Προθεσμιακή Αγορά (Forward/Futures Market) στην Ελλάδα λειτουργεί από το 2020, με τη έγκριση της Ελληνικής Επιτροπής Κεφαλαιαγοράς. Τη λειτουργία και την οργάνωση της αγοράς αναλαμβάνει το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (EXE) ενώ η εκκαθάριση των συναλλαγών πραγματοποιείται από την ATHEXClear.

Όλες οι αγοραπωλησίες ενέργειας οι οποίες λαμβάνουν χώρα πριν από την Αγορά Επόμενης Μέρας εμπίπτουν στη ζώνη ευθύνης της προθεσμιακής αγοράς ενέργειας. Στην Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά Ενέργειας διαπραγματεύονται τα Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης (ΣΜΕ). Τα εν λόγω συμβόλαια αναφέρονται σε συναλλαγές ενέργειας για τις οποίες καθορίζεται η ποσότητα ενέργειας, η τιμή της ενέργειας, ο χρόνος και η διάρκεια εκπλήρωσης του συμβολαίου. Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης μπορούν να συναφθούν είτε διμερώς (Over-The-Counter), είτε μέσω του οργανωμένου χρηματιστηρίου ενέργειας.

Η συγκεκριμένη αγορά ενέργειας χρησιμοποιείται από τους παραγωγούς για να κατοχυρώσουν τις μελλοντικές πωλήσεις ενέργειας αλλά και για να μειώσουν το ρίσκο που επιφέρουν οι ασταθείς τιμές ενέργειας που συναντώνται στην αγορά επόμενης μέρας. Ανάλογα, συναλλαγές μέσω της προθεσμιακής αγοράς ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθούν και από μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές οι οποίοι επιθυμούν να προ-αγοράσουν την απαιτούμενη ενέργεια σε συγκεκριμένη τιμή έτσι ώστε πιθανές αυξήσεις στην τιμή της ενέργειας να μην επιβαρύνουν απρόσμενα τον οικονομικό τους προϋπολογισμό.

Σε μία μελλοντική σύμβαση οι συμμετέχοντες δεσμεύονται για τη μελλοντική πώληση ενέργειας σε μια προαποφασισθείσα τιμή. Τα ΣΜΕ αποτελούν τυποποιημένα συμβόλαια τα οποία μπορούν τα τύχουν περεταίρω διαπραγμάτευσης, στη ελληνική αγορά διαπραγματεύονται τα ΣΜΕ Φορτίου Βάσης και τα ΣΜΕ Φορτίου Αιχμής τα οποία διακανονίζονται χρηματικά με δυνατότητα επιλογής φυσικού διακανονισμού [23]. Αντίθετα, τα Forwards είναι κατά κύριο λόγο διμερή συμβόλαια που δεν επιδέχονται περαιτέρω διαπραγμάτευση.

Η προθεσμιακή αγορά ενέργειας προσφέρει στους συμμετέχοντες την επιθυμητή απεξάρτηση από τις ευμετάβλητες τιμές ενέργειας της Αγοράς Επόμενης Μέρας και δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης μακροπρόθεσμων στρατηγικών τόσο στους πωλητές όσο και στους αγοραστές ενέργειας. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα προαιρετικής φυσικής παράδοσης στην Αγορά Επόμενης Μέρας δύναται να εξυπηρετήσει τους συμμετέχοντες στις αγορές άμεσης παράδοσης. Τέλος, τα πλεονεκτήματα της Ενεργειακής Χρηματοπιστωτικής Αγοράς μεταφράζονται σε φθηνότερες και καλύτερες υπηρεσίες για τον τελικό πελάτη.

2. Αγορά Επόμενης Μέρας :

Στην Αγορά Επόμενης Μέρας (Day-Ahead Market) επιτρέπεται η υποβολή εντολών συναλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη μέρα. Η ενέργεια στα πλαίσια της Αγοράς Επόμενης Μέρας ανταλλάσσεται τόσο με διμερή συμβόλαια όσο και με ανταλλαγή ισχύος. Στην αγορά αυτή δηλώνονται επίσης και οι ποσότητες ενέργειας που έχουν δεσμευτεί μέσω διενέργειας συναλλαγών επί προθεσμιακών προϊόντων που έχουν πραγματοποιηθεί είτε μέσω της χονδρικής αγοράς προθεσμιακών προϊόντων, είτε εκτός αυτής.

Η συμμετοχή στην αγορά αυτή είναι υποχρεωτική για τους παραγωγούς ενέργειας και προαιρετική για τους υπόλοιπους συμμετέχοντες. Οι παραγωγοί ενέργειας υποχρεούνται να καταθέσουν προσφορές πώλησης για το σύνολο της χωρητικότητας των μονάδων τους που δεν έχει εκχωρηθεί σε συναλλαγές ενέργειας στη χρηματοπιστωτική αγορά. Όλες οι συμμετοχές υποβάλλονται στο Σύστημα Συναλλαγών Αγοράς Ενέργειας (ΣΣΑΕ) το οποίο λειτουργεί αυτοματοποιημένα ενισχύοντας τη διαφάνεια της αγοράς.

Η Αγορά Επόμενης Μέρας λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο με το αναλυτικό της χρονοδιάγραμμα να περιέχεται στη 10^η τεχνική απόφαση ΕΧΕ [24]. Με την ολοκλήρωση των διαδικασιών της αγοράς, το άθροισμα των ποσοτήτων ενέργειας που προσφέρθηκαν και έγιναν αποδεκτές θα πρέπει να ισούται με τη πρόβλεψη φορτίου συνυπολογίζοντας επίσης τις διασυνοριακές ανταλλαγές ενέργειας.

Σημαντικό όφελος μιας Day-Ahead αγοράς ενέργειας είναι το επιπλέον χρονικό περιθώριο προγραμματισμού που προσφέρει αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος. Ακόμη η λειτουργία της Αγοράς Επόμενης μέρας μειώνει τα ποσά ενέργειας που συναλλάσσονται στην ενδοημερήσια αγορά και προστατεύει τους συμμετέχοντες από την μεταβλητότητα των τιμών. Τέλος, συμβάλλει στην αύξηση της ρευστότητας μέσω των χρηματοοικονομικών συμβάσεων.

3. Ενδοημερήσια αγορά:

Στην ενδοημερήσια αγορά ενέργειας (Intra-Day Market) οι συμμετέχοντες υποβάλλουν εντολές συναλλαγών για φυσική παράδοση την ημέρα εκπλήρωσης της φυσικής παράδοσης μετά την λήξη της προθεσμίας για την αγορά επόμενης μέρας. Η ενδοημερήσια αγορά λαμβάνει υπόψη τυχόν περιορισμούς που έχουν προκύψει από την αγορά εξισορρόπησης, τα αποτελέσματα της αγοράς επόμενης μέρας και τις ποσότητες ενέργειας που έχουν δεσμευθεί μέσω συναλλαγών επι προθεσμιακών προϊόντων ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσο πλησιάζει ο πραγματικός χρόνος παράδοσης γίνεται μια πιο ακριβής πρόβλεψη των συνθηκών που επικρατούν στη αγορά. Τυχόν αλλαγές που μπορεί να προκύψουν στη ζήτηση, η πιθανή αστοχία κάποιας μονάδας παραγωγής αλλά και οι ακριβέστερες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για τις ΑΠΕ μπορεί να αλλάξουν σημαντικά τα δεδομένα της αγοράς και να δημιουργήσουν αποκλίσεις στις προσφορές που υποβλήθηκαν στην Αγορά Επόμενης Μέρας. Η ενδοημερήσια αγορά ενέργειας επιτρέπει στους συμμετέχοντες να διορθώσουν τις θέσεις τους ούτως ώστε η παραγωγή να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική ζήτηση.

4. Αγορά Εξισορρόπησης:

Η ακριβής πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών αποτελεί σημαντική πρόκληση για τους διαχειριστές των αγορών αφού εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες. Σκοπός της Αγοράς Εξισορρόπησης (Balancing Market) είναι εξίσωση προσφοράς και ζήτησης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο προκειμένου οι καταναλωτές να προμηθεύονται ποιοτική ενέργεια.

Η αγορά εξισορρόπησης περιλαμβάνει την αγορά ισχύος εξισορρόπησης, την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης και τη διαδικασία εκκαθάρισης αποκλίσεων. Οι συμμετέχοντες έχουν υποχρέωση υποβολής προσφορών με υποχρέωση φυσικής παράδοσης για το σύνολο της διαθέσιμης ισχύος τους, τόσο στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης όσο και για την αγορά ισχύος εξισορρόπησης. Οι συμμετέχοντες στην αγορά αυτή μπορούν να υποβάλουν προσφορές εφεδρείας διατήρησης συχνότητας, προσφορές χειροκίνητης ή αυτόματης εφεδρείας αποκατάστασης συχνότητας και προσφορές ενέργειας εξισορρόπησης.

Στην ελληνική αγορά εξισορρόπησης η κατανομή των μονάδων γίνεται κεντρικά από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς μέσω Διαδικασιών Ενοποιημένου Προγραμματισμού. Τέλος, η διαδικασία Εκκαθάρισης Αποκλίσεων αναλαμβάνει την επιβολή χρεώσεων ή την καταβολή πληρωμών στα συμβαλλόμενα μέρη με ευθύνη εξισορρόπησης.

2.4 Πρόβλημα Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού

2.4.1 Σκοπός

Σκοπός του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού είναι η κάλυψη του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ημέρα κατανομής με το ελάχιστο δυνατό κόστος, εξασφαλίζοντας παράλληλα τόσο την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, όσον και την επάρκεια εφεδρειών για αντιμετώπιση πιθανής αστοχίας.

2.4.2 Χρονικό Πλαίσιο

Όλες οι διαδικασίες και οι πράξεις του ΗΕΠ αναφέρονται σε μία Ημέρα Κατανομής και ολοκληρώνονται εντός της ημέρας που προηγείται αυτής. Ως Ημέρα Κατανομής ορίζεται το χρονικό διάστημα 24 ωρών που συμπίπτει με μία ημερολογιακή ημέρα, ενώ ως Περίοδος Κατανομής ορίζεται μία ώρα της Ημέρας Κατανομής. Συνεπώς η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται καθημερινά με νέα δεδομένα εισόδου. Η προθεσμία υποβολής ορίζεται στις 12:30 της ημέρας που προηγείται της Ημέρας Κατανομής. Αφού παρέλθει η προθεσμία υποβολής, το χρηματιστήριο ενέργειας οφείλει εντός 90 λεπτών να δημοσιεύσει το Πρόγραμμα ΗΕΠ και να το κοινοποιήσει στον διαχειριστή του ΕΣΜΗΕ και τον διαχειριστή ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης. Ακολούθως ενημερώνονται οι συμμετέχοντες των οποίων οι Προσφορές Έγχυσης, Προσφορές Εφεδρειών και Δηλώσεις Φορτίου έγιναν αποδεκτές για το τμήμα του Προγραμματισμού ΗΕΠ που τους αφορά.

2.4.3 Συμμετοχές

Στο πρόβλημα του ημερήσιου προγραμματισμού συμμετάσχουν παραγωγοί, προμηθευτές καταναλωτές καθώς επίσης και οι αρμόδιοι φορείς της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κύριες Συμμετοχές στον ΗΕΠ είναι:

- **Δηλώσεις Φορτίου**

Οι δηλώσεις φορτίου περιλαμβάνουν ένα πίνακα με τον οποίο ο Εκπρόσωπος Φορτίου δηλώνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής και για κάθε Κατηγορία Μετρητών. Ακόμη είναι δυνατή η Δήλωση Φορτίου σε μορφή κλιμακωτής συνάρτησης τιμής και ποσότητας ενέργειας, όπου η κάθε βαθμίδα θα αποτελείται από ένα ζεύγος τιμής (€ ανά MWh) και ποσότητας ενέργειας (MWh).

- **Προσφορές Έγχυσης**

Οι Προσφορές Έγχυσης είναι κλιμακωτές συναρτήσεις τιμής και ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής. Οι συναρτήσεις αυτές περιλαμβάνουν έως 10 βαθμίδες με ζεύγη τιμής ενέργειας (€ ανά MWh) και ποσότητας ενέργειας (MWh). Επιπρόσθετα, οι τιμές ενέργειας διαδοχικών βαθμίδων θα πρέπει να είναι μονοτόνως μη φθίνουσες και εντός των ορίων που θέτουν η Διοικητικά Οριζόμενη Μέγιστη Τιμή Προσφοράς Ενέργειας και η Διοικητικά Οριζόμενη Ελάχιστη Τιμή Προσφοράς Ενέργειας.

- **Προσφορές Εφεδρείας**

Οι Προσφορές εφεδρείας αποτελούνται από δύο τιμές ισχύος (€ ανά MW) για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής. Οι δύο αυτές τιμές αναφέρονται στις τιμή για παροχή εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης και στην τιμή για τη παροχή εύρους δευτερεύουσας ρύθμισης. Οι τιμές αυτές συνοδεύονται από την εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης σε MW και το εύρος δευτερεύουσας ρύθμισης σε MW όπως αναγράφονται στη δήλωση τεχνικοοικονομικών στοιχείων της μονάδας.

- **Δήλωση Ολικής ή Μερικής Μη Διαθεσιμότητας μονάδων παραγωγής**

Στην περίπτωση απρόβλεπτης βλάβης που οφείλεται σε τεχνικά αίτια η οποία θέτει μερικώς ή ολοκληρωτικά τη μονάδα παραγωγής εκτός λειτουργίας ο κάτοχος της Άδειας Παραγωγής οφείλει να υποβάλει στον διαχειριστή του ΕΣΜΗΕ δήλωση ολικής ή μερικής μη διαθεσιμότητας της μονάδας. Η δήλωση αυτή θα πρέπει να αναφέρει τις Περιόδους Κατανομής της Ημέρας Κατανομής κατά τις οποίες υπάρχει η αδυναμία παραγωγής, καθώς επίσης και τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ στις περιπτώσεις μερικής διαθεσιμότητας. Αν υπάρξουν περαιτέρω πληροφορίες για τον χρόνο αποκατάστασης της μονάδας όταν μια δήλωση βρίσκεται εν ενεργεία, τότε η δήλωση αυτή τροποποιείται και υποβάλλεται εκ νέου.

- **Δηλώσεις Τεχνοοικονομικών Στοιχείων**

Κάθε κάτοχος άδειας παραγωγής οφείλει να υποβάλει Δήλωση Τεχνοοικονομικών Στοιχείων για κάθε μονάδα. Η δήλωση αυτή θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει το χρόνο που απαιτείται για επανένταξη της μονάδας στο δίκτυο, το μέγιστο και το ελάχιστο φορτίο αυτόματης ρύθμισης καθώς επίσης και τις δυνατότητες πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης. Επιπρόσθετα η δήλωση θα πρέπει να περιλαμβάνει τις παραμέτρους μεταβλητού κόστους της μονάδας όπως είναι τα κόστη καυσίμου, η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, η ποσοστιαία σύνθεση καυσίμων καθώς επίσης και το μέσο κόστος συντήρησης, εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και πρώτων υλών εκτός καυσίμου. Τέλος, θα πρέπει να περιλαμβάνει τα κόστη εκκίνησης και διατήρησης της μονάδας σε ετοιμότητα για την παροχή τριτεύουσας εφεδρείας.

2.4.4 Δεδομένα

Η επίλυση του ΗΕΠ απαιτεί μία πληθώρα δεδομένων για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται από το Χρηματιστήριο Ενέργειας και τροφοδοτούν τις διαδικασίες του ΗΕΠ. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι :

- Τα ζεύγη τιμής-ποσότητας ενέργειας που υποβλήθηκαν μέσω των Προσφορών Έγχυσης.
- Την ποσότητα ενέργειας που περιλαμβάνεται στις Προσφορές Έγχυσης των υδροηλεκτρικών μονάδων και την ποσότητα ενέργειας που προβλέπεται ότι θα εγχυθεί στο δίκτυο από μονάδες ΑΠΕ, Φωτοβολταϊκά στεγών και μονάδες ΣΗΘΥΑ (στις προσφορές αυτές δεν προσδιορίζεται τιμή ενέργειας).
- Την ποσότητα ενέργειας από τις Δηλώσεις φορτίου και τα ζεύγη τιμής-ενέργειας για τις Δηλώσεις Φορτίου που αφορούν εξαγωγή ή αντλητικές μονάδες.
- Τα ζεύγη Τιμής- Ισχύος Εφεδρείας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης από τις Προσφορές Εφεδρειών.
- Τα τεχνοοικονομικά στοιχεία και τη κατάσταση λειτουργίας των μονάδων.
- Τους περιορισμούς που θέτει το δίκτυο μεταφοράς
- Τη πρόβλεψη αναγκών εφεδρειών πρωτεύουσας, δευτερεύουσας και τριτεύουσας εφεδρείας.
- Τη πρόβλεψη φορτίου συστήματος
- Τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς των διασυνδέσεων και τον πίνακα δεσμεύσεων των διασυνδέσεων.
- Το πίνακα συντελεστών απωλειών Εγχύσεως και Φορτίου.

2.4.5 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η επίλυση του προβλήματος ΗΕΠ αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση της πρόβλεψης φορτίου με το ελάχιστο κόστος παραγωγής. Το συνολικό κόστος παραγωγής προκύπτει από το άθροισμα του κόστους παραγωγής ενέργειας για όλες τις Περιόδους Κατανομής της συγκεκριμένης Ημέρας Κατανομής. Στο κόστος παραγωγής συμπεριλαμβάνεται το κόστος που προκύπτει από τις Προσφορές Έγχυσης, τις Προσφορές Εφεδρειών, το ενδεχόμενο κόστος από τυχόν αποσυγχρονισμό ενταγμένης μονάδας, καθώς επίσης και το ενδεχόμενο κόστος παροχής Εφεδρείας Τριτεύουσας Ρύθμισης από μη συγχρονισμένη μονάδα. Συνεπώς, στόχος του ΗΕΠ είναι η ελαχιστοποίηση αυτής της σύνθετης συνάρτησης κόστους τηρώντας ένα σύνολο περιορισμών.

2.4.6 Περιορισμοί

Το πρόγραμμα ΗΕΠ αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο καλείται να επιλυθεί υπό κάποιους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος αλλά και τους διάφορους τεχνικούς περιορισμούς των μονάδων παραγωγής. Κάθε Περίοδος Κατανομής της Ημέρας Κατανομής υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς, επιπρόσθετα σε περιπτώσεις αδυναμίας επίλυσης του ΗΕΠ λόγω αδυναμίας ικανοποίησης κάποιου περιορισμού η παραβίαση των περιορισμών γίνεται με βάση συγκεκριμένη σειρά που ορίζεται από το «Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας». Βασικός περιορισμός του προβλήματος είναι η τήρηση του ισοζυγίου ενέργειας που ορίζουν οι Δηλώσεις Φορτίου και οι Προσφορές Έγχυσης. Απαραίτητη επίσης για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου, είναι η τήρηση ποσότητας εφεδρείας πρωτεύουσας, δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης, η οποία θα πρέπει να είναι άνω των ορίων που θέτουν οι κανονισμοί ασφαλείας του συστήματος. Ακόμη, κάθε μονάδα παραγωγής συνοδεύεται από κάποιους τεχνικούς περιορισμούς που θέτει ο κατασκευαστής για τη σωστή λειτουργία της, οι οποίοι θα πρέπει επίσης να τηρούνται. Τέλος, στην συνολική κατασκευή του προβλήματος θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι περιορισμοί που θέτουν οι δυνατότητες μεταφοράς του συστήματος είτε αυτές αφορούν διζωνικές μεταφορές ή διασυνοριακές μεταφορές.

2.4.7 Μεταβλητές-Αποτελέσματα Προβλήματος

Οι μεταβλητές του προβλήματος ΗΕΠ εντάσσονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, τις μεταβλητές απόφασης, τις εξαρτημένες μεταβλητές και τις μεταβλητές χαλάρωσης. Οι μεταβλητές απόφασης έχουν δυαδικό χαρακτήρα και παίρνουν τιμές για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής. Οι μεταβλητές απόφασης καθορίζουν τη κατάσταση της κάθε μονάδας παραγωγής όσον αφορά τη λειτουργία, τη δέσμευση, τη διαδικασία εκκίνησης και τη διαδικασία σβέσης. Επιπρόσθετα η ικανότητα έγχυσης ή απορρόφησης ενέργειας για κάθε

βαθμίδα και η ικανότητα παροχής Επικουρικών υπηρεσιών, επίσης αναπαρίστανται από μεταβλητές απόφασης στο πρόβλημα που κατασκευάζεται.

Όσον αφορά τις εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος, αυτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ικανοποίησης των περιορισμών που πλαισιώνουν το πρόβλημα και εξαρτώνται από τις προαναφερθείσες μεταβλητές απόφασης. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται στα ποσά ενέργειας που εγχέει η κάθε μονάδα στο δίκτυο σε κάθε Περίοδο Κατανομής, στα ποσά ενέργειας που διατηρούνται ως εφεδρεία, τα τεχνικά όρια δικτύου και μονάδων κ.α.

Μια άλλη κατηγορία μεταβλητών είναι οι μεταβλητές χαλάρωσης οι οποίες αποτελούν τις δικλείδες ασφαλείας του προβλήματος. Στις περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος δεν συγκλίνει σε κάποια λύση οι μεταβλητές αυτές μοντελοποιούν κάποιους μηχανισμούς χαλάρωσης των περιορισμών έτσι ώστε το πρόβλημα να καταστεί επιλύσιμο. Η ενεργοποίηση αυτών των μηχανισμών χαλάρωσης των περιορισμών του προβλήματος επιφέρει επιπλέον κόστος στην αντικειμενική συνάρτηση ανάλογα με τη σημαντικότητα του περιορισμού που παραβιάζεται και το μέγεθος της παραβίασης. Τα κόστη παραβίασης κάθε περιορισμού ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ζωτικής σημασίας περιορισμοί του προβλήματος να κρατούνται απαραβίαστοι στις πλείστες των περιπτώσεων, τα κόστη χαλάρωσης μεταβάλλονται ανάλογα με τις επιπτώσεις της εκάστοτε χαλάρωσης στην ασφάλεια και την ποιότητα των υπηρεσιών του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος ΗΕΠ είναι :

- Συγχρονισμός ή μη έκαστης μονάδας για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας παραγωγής έτσι ώστε παρέχει ενέργεια ή/και επικουρικές υπηρεσίες.
- Ποσότητες ενέργειας που πρόκειται να εγχυθούν και να απορροφηθούν ανά συμμετέχοντα
- Ποσότητες εφεδρείας πρωτεύουσας, δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης ανά συμμετέχοντα
- Αριθμητική τιμή του δείκτη Reserve Mark-Up
- Οριακή Τιμή Συστήματος
- Οριακές Τιμές Παραγωγής για κάθε Περίοδο Κατανομής
- Μοναδιαίες Τιμές Πληρωμής επικουρικών υπηρεσιών για κάθε Περίοδο Κατανομής

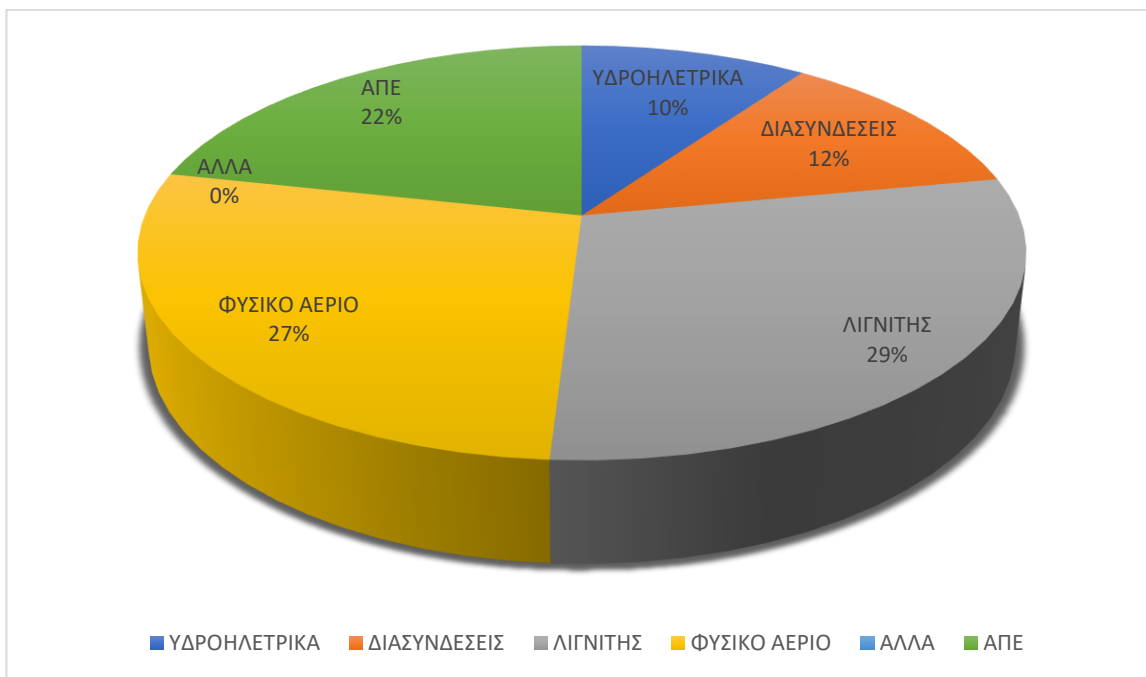
2.5 Υφιστάμενο Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής

Στο υφιστάμενο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής η εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται στα 18,5 GW . Ο Πίνακας 2-1 συνοψίζει το υφιστάμενο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής ανά τεχνολογία. Η πλειονότητα του συστήματος αποτελείται από θερμικές μονάδες, λιγνιτικές και μονάδες φυσικού αερίου. Οι θερμικές μονάδες καλύπτουν το 51% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Σημαντική είναι επίσης η εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών μονάδων αφού καλύπτουν περίπου το 17% της ισχύος του Ελληνικού συστήματος παραγωγής. Αρκετή βαρύτητα έχει δοθεί στην απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής με την αδειοδότηση πολυάριθμων έργων ΑΠΕ σε ολόκληρη τη χώρα, το ύψος ισχύος των οποίων ανέρχεται στα 30,3 GW. Ο κύριος όγκος ισχύος αφορά Αιολικά πάρκα (Α/Π) και Φωτοβολταϊκούς σταθμούς (Φ/Β). Στις χορηγηθείσες άδειες συμπεριλαμβάνονται επίσης μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΗΣ) και Σταθμοί καύσης βιομάζας ή βιοαερίου (ΣΒΙΟ) αλλά σε σημαντικά μικρότερη έκταση. Μέχρι και τον Οκτώβριο του 2019 στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) λειτουργούσαν σταθμοί ΑΠΕ συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 6062 MW, εκ των οποίων τα 3064 MW αφορούν Α/Π και τα 2569 MW αφορούν Φ/Β.

	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	(%)
Θερμικές Μονάδες	9.319,3	50,5
Υδροηλεκτρικές Μονάδες	3.170,7	17,2
ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ	5.962,1	32,3
ΣΥΝΟΛΟ	18.452,10	100,0

Πίνακας 2-1 Υφιστάμενη Κατάσταση Συστήματος Ηλεκτροπαραγωγής ανά τεχνολογία (01/10/19)

Συγκρίνοντας την ποσοστιαία κατανομή Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που παρουσιάζεται στο Γράφημα 2-1 με τα ποσοστά εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία παρατηρούμε ότι τα ποσοστά διαφέρουν. Συγκεκριμένα η συνεισφορά των υδροηλεκτρικών μονάδων στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι σχετικά μικρή αφού ανέρχεται σε μόλις στο 10%. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα ύδατος υποχρεώνει της υδροηλεκτρικές μονάδες να λειτουργούν κυρίως ως μονάδες αιχμής. Σύμφωνα με τα στοιχεία παραγωγής για την τελευταία δεκαετία ο συντελεστής των υδροηλεκτρικών μονάδων κυμαίνεται από 10 μέχρι 20%. Όσο αφορά τις θερμικές μονάδες στο Γράφημα 2-1 καταγράφεται κάλυψη του 56,4% της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια από λιγνιτικές μονάδες και μονάδες φυσικού αερίου. Τέλος, η συνεισφορά των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο ακολουθεί συνεχώς μια ανοδική πορεία αφού από 4% το έτος 2008, ανήλθε στο 22% το έτος 2018[25].



Γράφημα 2-1 Ποσοστιαία Κατανομή παραγωγής Ενέργειας για το έτος 2018

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τα στοχαστικά προβλήματα βέλτιστης ένταξης μονάδων και γίνεται αναφορά στις πηγές που αποτέλεσαν έμπνευση για αυτή την εργασία. Επιπρόσθετα γίνεται μια μικρή αναφορά στην μαθηματική βελτιστοποίηση και ειδικότερα στο στοχαστικό προγραμματισμό.

3.2 Μαθηματική Βελτιστοποίηση

Η επιλογή της καλύτερης λύσης από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών με βάση κάποια κριτήρια ονομάζεται μαθηματική βελτιστοποίηση. Ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης (Mathematical optimization problem), η απλά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & f_0(x) \\ \text{subject to} & f_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, m \end{array} \quad (3.1)$$

Στη περίπτωση αυτή το διάνυσμα $x = (x_1, \dots, x_n)$ αποτελεί τη μεταβλητή βελτιστοποίησης του προβλήματος, η συνάρτηση $f_0 : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και οι συναρτήσεις $f_i : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}, i = 1, \dots, m$ είναι οι συναρτήσεις περιορισμού, τέλος οι σταθερές b_i αποτελούν τα όρια για τους περιορισμούς. Ένα διάνυσμα x^* χαρακτηρίζεται βέλτιστο ή λύση του προβλήματος (3.1) εάν προκύπτει από αυτό ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μεταξύ όλων των διανυσμάτων που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος $\forall z : f_1(z) \leq b_1, \dots, f_m(z) \leq b_m, \exists f_0(z) \geq f_0(x^*)$ [26].

Ανάλογα με τη μορφή των εξισώσεων που ορίζουν το πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης το πρόβλημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως γραμμικό, μη γραμμικό, ακέραιου προγραμματισμού, στοχαστικό, δυναμικό ή και συνδυασμός αυτών.

3.2.1 Γραμμικός Μαθηματικός Προγραμματισμός

Σημαντική κατηγορία των προβλημάτων βελτιστοποίησης αποτελεί ο γραμμικός προγραμματισμός, στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση αλλά και όλες οι συναρτήσεις περιορισμού είναι γραμμικές :

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & c^T x \\ \text{subject to} & a_i^T x \leq b_i, i = 1, \dots, m \end{array} \quad (3.2)$$

Εδώ τα διανύσματα $c, a_1, \dots, a_m \in R^n$ και οι τιμές $b_1, \dots, b_m \in R$ είναι οι παράμετροι που καθορίζουν την αντικειμενική συνάρτηση και τις συναρτήσεις περιορισμών.

3.2.2 Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός

Υποκατηγορία του γραμμικού προγραμματισμού αποτελεί ο μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός. Η υποκατηγορία αυτή περιλαμβάνει προβλήματα στα οποία κάποιες από τις μεταβλητές καθορίζονται ως ακέραιοι αριθμοί ενώ για κάποιες άλλες επιτρέπεται να λαμβάνουν και μη ακέραιες τιμές. Σε πολλά προβλήματα χρησιμοποιούνται οι δυαδικές μεταβλητές που αποτελούν υποσύνολο των ακέραιων μεταβλητών και μπορούν να πάρουν αποκλειστικά τις τιμές 1 ή 0 . Οι δυαδικές αυτές μεταβλητές χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της κατάστασης διαφόρων γεγονότων όταν αυτή έχει μόνο δύο πιθανές καταστάσεις.

Πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού αποτελεί η υλοποίηση του Ενεργειακού Ημερήσιου Προγραμματισμού (ΗΕΠ) ενός αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο συμμετέχουν συμβατικές μονάδες παραγωγής αλλά και διάφορες μονάδες ΑΠΕ. Οι δυαδικές μεταβλητές είναι απαραίτητες έτσι ώστε να αποφασιστεί η κατάσταση λειτουργίας της κάθε μονάδας (αν είναι ενταγμένη ή όχι στο σύστημα) για κάθε χρονικό διάστημα του προγραμματισμού.

3.2.3 Στοχαστικός Προγραμματισμός

Ο στοχαστικός προγραμματισμός αποτελεί τη μέθοδο μοντελοποίησης προβλημάτων βελτιστοποίησης τα οποία περιέχουν κάποια μορφή αβεβαιότητας. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του οποίου μερικές ή ακόμη και όλες οι παράμετροι ακολουθούν μια γνωστή κατανομή ορίζεται ως στοχαστικό. Η πλειοψηφία των προβλημάτων που μπορεί να συναντήσει κάποιος στον πραγματικό κόσμο περιέχει κάποιες μορφής αβεβαιότητα, έτσι λοιπόν ο στοχαστικός προγραμματισμός συναντάται σε διάφορους τομείς όπως είναι αυτός των οικονομικών, των μεταφορών αλλά και στον τομέα της ενέργειας που εντάσσεται η παρούσα εργασία[27]. Ένα στοχαστικό πρόγραμμα λοιπόν καλείται να καταλήξει στη βέλτιστη λύση ενός

προβλήματος κάτω από κάποια συγκεκριμένα κριτήρια συνυπολογίζοντας παράλληλα την αβεβαιότητα που εισάγουν οι παράμετροι του.

3.2.3.1 Στοχαστικά Προβλήματα δύο σταδίων

Σε ένα στοχαστικό μοντέλο προγραμματισμού δύο σταδίων, οι μεταβλητές απόφασης χωρίζονται σε δύο σύνολα, τις μεταβλητές πρώτου σταδίου και τις μεταβλητές δευτέρου σταδίου. Οι αποφάσεις που αφορούν τις μεταβλητές πρώτου σταδίου λαμβάνονται πριν από την αποκάλυψη των τυχαίων μεταβλητών. Μετά την αποκάλυψη της αβεβαιότητας του προβλήματος, περεταιίρω διορθώσεις στο πρόβλημα μπορούν να γίνουν μέσω των μεταβλητών δευτέρου σταδίου. Τέτοιου τύπου εφαρμογές χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα γραμμικού, ακέραιου και μη γραμμικού προγραμματισμού.

Η κλασική μορφή ενός στοχαστικού γραμμικού προβλήματος δύο σταδίων είναι :

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x + E[Q(x, \xi(\omega))] \\ \text{subject to} \quad & Ax = b, x \geq 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου $Q(x, \xi(\omega))$ η βέλτιστη τιμή του προβλήματος δευτέρου σταδίου:

$$\begin{aligned} \min \quad & q^T y \\ \text{subject to} \quad & Tx + Wy = h, y \geq 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

όπου x, y τα διανύσματα των μεταβλητών απόφασης πρώτου και δευτέρου σταδίου αντίστοιχα. Το πρόβλημα δευτέρου σταδίου εξαρτάται από τα δεδομένα $\xi = (q, h, T, W)$ όπου κάποιο ή όλα μπορούν να είναι τυχαία. Το αποτέλεσμα του (3.3) σχετίζεται με την κατανομή του $\xi(\omega)$ και το πρόβλημα δευτέρου σταδίου (3.4) μπορεί να θεωρηθεί ως ποινή για την παραβίαση του περιορισμού $Tx = h$.

3.2.3.2 Αλγόριθμοι decomposition

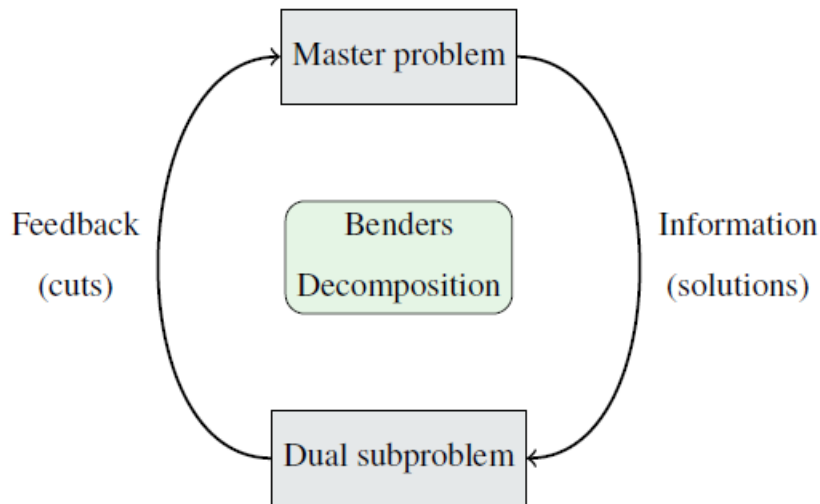
Μία επιλογή για την επίλυση ενός στοχαστικού προβλήματος Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού το οποίο περιγράφεται από τη (3.3) είναι οι εμπορικά διαθέσιμοι επιλυτές όπως είναι ο CPLEX, GUROBI κτλ. Εντούτοις, η απευθείας επίλυση του προβλήματος μπορεί να αποβεί απαγορευτική σε προβλήματα με μεγάλο αριθμό σεναρίων καθώς η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς αυξάνεται εκθετικά. Έτσι λοιπόν λόγω των δυσκολιών που ενέχει η επίλυση των αντίστοιχων ντετερμινιστικών προβλημάτων, αλγόριθμοι αποσύνθεσης όπως ο Langrangian decomposition[28], [29] και ο Benders decomposition[30],[31] μπορούν να εφαρμοστούν για μια πιο αποδοτική επίλυση του προβλήματος

3.2.3.3 Benders decomposition

Ο αλγόριθμος αποσύνθεσης Benders είναι γνωστός και ως μέθοδος L-shape στην βιβλιογραφία του στοχαστικού προγραμματισμού. Η Benders decomposition είναι μια τεχνική μαθηματικού προγραμματισμού η οποία μας επιτρέπει να λύσουμε γραμμικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας τα οποία ακολουθούν μια συγκεκριμένη δομή. Τα προβλήματα στα οποία απευθύνεται η εν λόγω τεχνική συναντώνται κυρίως σε εφαρμογές στοχαστικού προγραμματισμού όπου η αβεβαιότητα ενσωματώνεται στο πρόβλημα μέσω διαφόρων σεναρίων. Η τεχνική έχει πάρει το όνομα της από τον δημιουργό της Jacques F. Benders.

Η στρατηγική πίσω από την τεχνική Benders εμπνέεται από το διαίρει και βασίλευε. Αρχικά ο αλγόριθμος της μεθόδου ξεκινά ορίζοντας ένα κύριο πρόβλημα (master problem) το οποίο περιέχει μόνο τις μεταβλητές πρώτου σταδίου. Στη συνέχεια το κύριο πρόβλημα επιλύεται και οι μεταβλητές πρώτου σταδίου λαμβάνουν τις βέλτιστες τιμές. Ακολουθώς το ντετερμινιστικό ισοδύναμο πρόβλημα μπορεί να αποσυντεθεί σε N υποπροβλήματα με N τον αριθμό των διαθέσιμων σεναρίων. Τα υποπροβλήματα αυτά λύνονται με βάση τις προκαθορισμένες βέλτιστες τιμές των μεταβλητών πρώτου σταδίου. Όλα τα υποπροβλήματα που κατασκευάζονται είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και μπορούν να λυθούν παράλληλα, αυτό αποτελεί και το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου.

Στην περίπτωση που κάποιο από τα υποπροβλήματα δευτέρου σταδίου που κατασκευάστηκαν κριθεί εξ ορισμού μη επιλύσιμο εισάγεται στο κύριο πρόβλημα ένας περιορισμός επίλυσης (feasibility cut), το κύριο πρόβλημα επιλύεται ξανά και προκύπτουν νέες βέλτιστες τιμές για τις μεταβλητές πρώτου σταδίου. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι που το πάνω και κάτω όριο να συγκλίνουν εισάγοντας σε κάθε επανάληψη ένα ακόμη περιορισμό βελτιστοποίησης στο κύριο πρόβλημα. Το κάτω όριο είναι η βέλτιστη λύση του κυρίως προβλήματος ενώ το πάνω όριο προκύπτει από την βέλτιστη λύση του συνολικού προβλήματος. Η μέθοδος αποδεικνύεται ότι συγκλίνει σε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων όταν οι μεταβλητές δευτέρου σταδίου είναι όλες συνεχείς και οι περιορισμοί δευτέρου σταδίου γραμμικοί.



Σχήμα 3-1 Σχηματική αναπαράσταση Μεθόδου Benders decomposition

3.2.3.4 Δειγματοληψία Monte Carlo και Εκτίμηση Δειγματικού Μέσου

Η δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού συνόλου σεναρίων είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα των αποτελεσμάτων ενός στοχαστικού προβλήματος. Ο αριθμός των σεναρίων που κατασκευάζονται θα πρέπει να είναι σχετικά περιορισμένος έτσι ώστε το στοχαστικό ισοδύναμο πρόβλημα να μπορεί να επιλυθεί χωρίς υπερβολική υπολογιστική προσπάθεια. Στη θεωρία, μια προσομοίωση του προβλήματος μπορεί εύκολα να πιστοποιήσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων για το δοθέν σύνολο σεναρίων. Στη πράξη όμως μόνο η βέλτιστη λύση του πρώτου σταδίου έχει πρακτική σημασία αφού σχεδόν πάντα η πραγματοποίηση των τυχαίων γεγονότων θα είναι διαφορετική από τα σενάρια που κατασκευάστηκαν. Έτσι λοιπόν τα σενάρια θα πρέπει να προσεγγίζουν με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές.

Όταν αντιμετωπίζουμε μια σημαντική αβεβαιότητα στη διαδικασία μιας προσέγγισης, παρά να αντικαταστήσουμε τη τυχαία μεταβλητή με τη μέση τιμή της, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε την προσομοίωση Monte Carlo η οποία θα μπορούσε να καταλήξει σε μία καλύτερη λύση χρησιμοποιώντας πολλαπλές τιμές. Μία προσομοίωση Monte Carlo αντικαθιστά τη μεταβλητή ή τις μεταβλητές του προβλήματος που περιέχουν την αβεβαιότητα με μία τυχαία τιμή που ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή. Στη συνέχεια το μοντέλο προσομοίωσης παράγει τα αποτελέσματα με βάση τη συγκεκριμένη τιμή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές της τυχαίας μεταβλητής. Όταν η προσομοίωση ολοκληρωθεί ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων αποτελεί μια εκτίμηση.

Υποθέτοντας λοιπόν ότι μπορούμε να παράξουμε ένα δείγμα $\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^N$ από N τιμές του τυχαίου διανύσματος ξ . Τότε η συνάρτηση $q(x) = E[Q(x, \xi)]$ προσεγγίζεται από το δειγματικό μέσο:

$$q_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q(x, \xi^j) \quad (3.5)$$

Σύμφωνα λοιπόν με το Νόμο των μεγάλων αριθμών προκύπτει ότι η συνάρτηση (3.5) συγκλίνει με πιθανότητα 1 στη μέση τιμή $E[Q(x, \xi)]$ καθώς το N τείνει στο άπειρο ($N \rightarrow \infty$).

Συνεπώς για την κλασική μορφή ενός στοχαστικού προβλήματος δύο σταδίων που περιγράφεται από την εξίσωση (3.3) μπορεί να κατασκευαστεί η αντίστοιχη προσέγγιση :

$$\begin{aligned} \min c^T x + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q(x, \xi^j) \\ \text{subject to } Ax = b, x \geq 0 \end{aligned}$$

με $\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^N$ σεναρία ίσης πιθανότητας $p = \frac{1}{N}$

Το παραπάνω ανάπτυγμα είναι γνωστό ως Sample Average Approximation method (SAA). Η εφαρμογή της μεθόδου δημιουργεί μία συνάρτηση του δοθέντος τυχαίου δείγματος και από αυτή τη σκοπιά θεωρείται παρομοίως τυχαία.

3.3 Επιλυτής GUROBI

Ο Gurobi optimizer αποτελεί έναν από τους κορυφαίους εμπορικά διαθέσιμους επιλυτές. Κατασκευάστηκε και υποστηρίζεται από την ομώνυμη εταιρεία Gurobi και πήρε το όνομα του από τους δημιουργούς του Zonghao Gu, Edward Rothberg και Robert Bixby. Ο επιλυτής αυτός αποτελεί το εργαλείο μετατροπής των δεδομένων σε έξυπνες αποφάσεις για περισσότερες από 2500 εταιρείες. Ο Gurobi Optimizer επιτρέπει στους χρήστες του να μετατρέπουν πολύπλοκα προβλήματα σε μαθηματικά μοντέλα και να επιλέγουν την βέλτιστη λύση μέσα από αμέτρητες επιλογές. Υποστηρίζει όλες της μεγάλες οικογένειες προβλημάτων όπως Linear programming (LP), Mixed-Integer linear programming (MILP), Quadratic programming (QP), Mixed-integer quadratic programming (MIQP), Quadratically-constrained programming (QCP) και Mixed-integer quadratically-constrained programming (MIQCP).

3.4 Στοχαστικά Μοντέλα Βέλτιστης Ένταξης

Στο [32] γίνεται μια εκτεταμένη παρουσίαση του προβλήματος βέλτιστης ένταξης μονάδων παραγωγής μέσω ντετερμινιστικών και στοχαστικών μοντέλων δύο σταδίων. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση της μαθηματικής κατασκευής των προβλημάτων αλλά και των διαφόρων μεθόδων επίλυσης τους. Αναφέρεται στην πλειοψηφία των περιορισμών που πλαισιώνουν το πρόβλημα βέλτιστης ένταξης και τις διάφορες παραλλαγές του προβλήματος που συναντώνται. Περιέχει επίσης αποτελέσματα των προτεινόμενων μοντέλων που κατασκευάζονται για συγκεκριμένα σενάρια. Γενικότερα, αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση των προβλημάτων βελτιστοποίησης αυτού του είδους και αποτέλεσε κύρια πηγή έμπνευσης για την παρούσα εργασία.

Στο [33] παρουσιάζεται ένα πρόβλημα ένταξης μονάδων υπό αβεβαιότητα στην αιολική παραγωγή. Στόχος του προβλήματος είναι η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Στο προτεινόμενο μοντέλο οι διαχειριστές των συστημάτων υποβάλουν προσφορές αξιοποίησης αιολικής ισχύος με συγκεκριμένη πιθανότητα. Έτσι λοιπόν το ρίσκο για τυχόν περικοπές στην αιολική παραγωγή λόγω περίσσειας ισχύος ρυθμίζεται από τους λειτουργούς του συστήματος. Το στοχαστικό μοντέλο δύο σταδίων που προτείνεται περιέχει επίσης περιορισμούς πιθανότητας που αφορούν την αβεβαιότητα στην αιολική παραγωγή την οποία καλείται να αντιμετωπίσει. Το πρώτο στάδιο του μοντέλου αποτελείται από το κλασικό πρόβλημα ένταξης μονάδων και λαμβάνει τις αποφάσεις για τα ποσά αιολικής ενέργειας που πρόκειται να αξιοποιηθούν (σύμφωνα με την πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής). Στο δεύτερο στάδιο του προβλήματος αφού γίνει η αποκάλυψη της αβεβαιότητας αναπαρίσταται το επιπλέον κόστος που θα επιφέρει η τυχόν ανεπάρκεια ισχύος.

Η διείσδυση των ΑΠΕ στα μοντέρνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εισάγει σημαντικές αβεβαιότητες στο πρόβλημα ένταξης μονάδων. Στο [34] προτείνεται ένα στοχαστικό μοντέλο για την αντικατάσταση των συμβατικών ντετερμινιστικών προσεγγίσεων του προβλήματος που δεν μπορούν πλέον να είναι ικανοποιητικά αποδοτικές. Το προτεινόμενο μοντέλο περιλαμβάνει περιορισμούς στην διείσδυση των ΑΠΕ ανάλογα με την διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος προκειμένου να διασφαλίσει την αξιοπιστία του συστήματος. Το σύστημα περιλαμβάνει διάφορους τύπους ΑΠΕ για κάθε ένα από τους οποίους δημιουργούνται σενάρια ελάχιστης, μέγιστης και αναμενόμενης παραγωγής για τα οποία δίνεται και η πιθανότητα πραγματοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος στοχεύει στη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας βελτιστοποιώντας παράλληλα την αναγκαία εφεδρεία ανάλογα με την αναμενόμενη παραγωγή των ΑΠΕ για την αποφυγή ποινών από πιθανή αδυναμία κάλυψης της ζήτησης.

Στο [35] αναπτύσσεται ένα στοχαστικό μοντέλο βέλτιστης ένταξης για ένα υβριδικό μικροδίκτυο για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών. Το μικροδίκτυο του προβλήματος αποτελείται από συμβατικές μονάδες, μονάδες ΑΠΕ και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η αβεβαιότητα στο μοντέλο εισάγεται μέσω του φορτίου, η πρόβλεψη για το φορτίο συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης σφάλματος γίνεται μέσω ενός αυτοπαλινδρομικού μοντέλου κινητού μέσου όρου (ARIMA). Το στοχαστικό μοντέλο καλείτε να προβλέψει τη ποσότητα της αναγκαίας στρεφόμενης εφεδρείας για την κάλυψη της αβεβαιότητας του φορτίου με στόχο την οικονομικότερη λειτουργία του μικροδικτύου. Επιπρόσθετα το μοντέλο διαχειρίζεται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το οποίο υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς λειτουργίας και έχει στόχο την περεταίρω μείωση της αναγκαίας στρεφόμενης εφεδρείας από τις ενταγμένες συμβατικές μονάδες. Τέλος, όσο αφορά τις μονάδες ΑΠΕ γίνεται η παραδοχή για απόλυτα ακριβή πρόβλεψη για απλοποίηση του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Ένα μικροδίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο από μονάδες παραγωγής, φορτία και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με στόχο την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα σύγχρονα μικροδίκτυα οι μονάδες παραγωγής απαρτίζονται τόσο από θερμικούς σταθμούς αλλά και από διαφόρων ειδών ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το γεγονός ότι η ισχύς εξόδου των ΑΠΕ είναι πολλές φορές αδύνατον να καθοριστεί επακριβώς εισάγει στην πλευρά της παραγωγής μια πηγή αβεβαιότητας. Επιπρόσθετα, η κατανομή του φορτίου αποτελεί παραδοσιακά την κύρια πηγή αβεβαιότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυτή τη φορά για τη πλευρά της κατανάλωσης. Στη παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάζεται ένα στοχαστικό μοντέλο δύο σταδίων το οποίο καλείται να λάβει τις αποφάσεις βέλτιστης ένταξης μονάδων παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας και στις δύο πλευρές. Εκτός από τη πλευρά της κατανάλωσης όπου η αβεβαιότητα εισάγεται μέσω του απρόβλεπτου φορτίου, στη πλευρά της παραγωγής η αβεβαιότητα εισάγεται μέσω της αιολικής ενέργειας που εγχέεται στο μικροδίκτυο.

Το μικροδίκτυο μοντελοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί μια όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των μικροδικτύων που συναντώνται στο πραγματικό κόσμο. Αποτελείται από μία θερμική μονάδα παραγωγής, αβέβαιο φορτίο και ένα αιολικό πάρκο. Το μικροδίκτυο αυτό αλληλοεπιδρά μονόδρομα με το κυρίως δίκτυο έχοντας την δυνατότητα αγοράς ενέργειας από την εταιρεία διαχείρισης του δικτύου. Η αγορά ενέργειας από το ανάντη δίκτυο αναπαρίσταται ρεαλιστικά μέσω των προθεσμιακών συμβολαίων (forward contracts) και των συμβολαίων πραγματικού χρόνου (real-time contracts).

Τέλος, στόχος της έρευνας είναι να απαντήσει σε τρία ερωτήματα. Πρώτο, δείχνει πώς ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει βέλτιστα υπό αβεβαιότητα. Δεύτερο, το πρόβλημα μελετά την αποδοτικότητα των λειτουργιών ενός μικροδικτύου από τη σκοπιά ενός προβλήματος δύο σταδίων. Τέλος, εξετάζονται και επιδεικνύονται τα πλεονεκτήματα των στοχαστικών μοντέλων έναντι αντίστοιχων ντετερμινιστικών προσεγγίσεων.

4.2 Πίνακας συμβόλων

Ξεκινούμε την ανάλυση του μοντέλου με την παράθεση όλων των συμβολισμών για τις παραμέτρους και τις μεταβλητές που περιλαμβάνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Παράμετροι

κ_{FW}	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για προθεσμιακά συμβόλαια
κ_{RT}	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για συμβόλαια πραγματικού χρόνου
c_g^u	Στατικό κόστος κατανάλωσης καυσίμου για τη μονάδα g [$\text{€}\backslash h$]
c_g^p	Γραμμικό κόστος κατανάλωσης καυσίμου για τη μονάδα g [$\text{€}\backslash kW h$]
$l[h]$	Συνολικό φορτίο [KW]
$w[h]$	Ισχύς εξόδου Αιολικού Πάρκου [KW]
RU_g	Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος της μονάδας g
RD_g	Μέγιστος ρυθμός μείωσης ισχύος της μονάδας g
T_g^{dn}	Ελάχιστος χρόνος μη-λειτουργίας της μονάδας g
T_g^{up}	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της μονάδας g

Μεταβλητές

$p_g[h]$	Παραχθείσα ενέργεια από τη μονάδα g
$p_{FW}[h]$	Αγορασθείσα ενέργεια από προθεσμιακά συμβόλαια
$p_{RT}[h]$	Αγορασθείσα ενέργεια από συμβόλαια πραγματικού χρόνου
$u_g[h]$	Κατάσταση ένταξης μονάδας g

4.3 Κατασκευή προβλήματος

Το υποκεφάλαιο αυτό περιγράφει τη μαθηματική μοντελοποίηση του στοχαστικού προβλήματος βέλτιστης ένταξης μονάδων παραγωγής δύο σταδίων που μελετήθηκε (two-stage stochastic unit commitment problem).

Η εξίσωση (4.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του πρώτου σταδίου που έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, εστιάζοντας στους επιμέρους όρους της εξίσωσης, ο πρώτος όρος αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του σταθερού κόστους λειτουργίας των ενταγμένων μονάδων. Ο δεύτερος όρος έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που πρόκειται να αγορασθεί μέσω προθεσμιακών συμβολαίων (forward contracts) και τέλος ο τελευταίος όρος αναφέρεται στον ακαθόριστο παράγοντα του κόστους δευτέρου σταδίου $\mathbb{E}[F(x, \tilde{l}, \tilde{w})]$. Οι μεταβλητές απόφασης για το πρώτο στάδιο του προβλήματος είναι η κατάσταση ένταξης της κάθε μονάδας $u_g[h]$ και το ποσό ενέργειας που πρόκειται να αγοραστεί μέσω προθεσμιακών συμβολαίων $p_{FW}[h]$. Το πρώτο στάδιο του προβλήματος υπόκειται στο περιορισμό (4.3) ο οποίος εξασφαλίζει τη μονόδρομη ζεύξη μικροδικτύου και ανάντη δικτύου. Απαγορεύει δηλαδή την πώληση ενέργειας διαμέσου των προθεσμιακών συμβολαίων. Οι περιορισμοί (4.4) και (4.5) αφορούν τον ελάχιστο χρόνο απένταξης και ένταξης της κάθε μονάδας αντίστοιχα.

$$\min \left\{ \sum_{h \in H} [c_g^u u_g[h] + \kappa_{FW}[h] p_{FW}[h]] + \mathbb{E}[F(x, \tilde{l}, \tilde{w})] \right\} \quad (4.1)$$

έτσι ώστε :

$$u_g[h] \in \{0,1\} \quad (4.2)$$

$$p_{FW}[h] \geq 0 \quad (4.3)$$

$$u_g[h-1] - u_g[h] \leq 1 - u_g[\tau], \quad (4.4)$$

$$\forall h \in H, h \leq \tau \leq \min\{h-1 + T_g^{dn}, H\}$$

$$u_g[h] - u_g[h-1] \leq u_g[\tau], \quad (4.5)$$

$$\forall h \in H, h \leq \tau \leq \min\{h-1 + T_g^{up}, H\}$$

Ο τελευταίος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης του κυρίως προβλήματος $E[f(x, \tilde{l}, \tilde{w})]$ αναφέρεται στο μέσο κόστος που προκύπτει από το δεύτερο στάδιο. Συνεπώς δεν είναι δόκιμη η επίλυση του προβλήματος για ένα συγκεκριμένο $x \in X$. Αντί αυτού προσεγγίζουμε τη βέλτιστη λύση του προβλήματος με την τεχνική Sample Average Approximation (SAA). Η τεχνική αυτή δημιουργεί αρχικά ένα τυχαίο δείγμα τιμών ξ_1, \dots, ξ_N μεγέθους N και στη συνέχεια φτάνουμε στη μέση τιμή με τη προσέγγιση δειγματικού μέσου που δίνεται από την (4.8).

$$\min E[f(x, \xi)] = \min \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x, \xi_j) \right\} \quad (4.6)$$

Με βάση λοιπόν την εξίσωση (4.6) αντικειμενική συνάρτηση πρώτου σταδίου γίνεται:

$$\min_{h \in H} \left[c_g^u u_g[h] + \kappa_{FW}[h] p_{FW}[h] \right] + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x, \xi_j) \quad (4.7)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση για το δεύτερο στάδιο του προβλήματος (4.8) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας με βάση τις εκάστοτε ενταγμένες θερμικές μονάδες. Επιπρόσθετα, βελτιστοποιείται η συμμετοχή του μικροδικτύου στην αγορά πραγματικού χρόνου για μια συγκεκριμένη περίπτωση φορτίου l^v και αιολικής παραγωγής w^v . Οι μεταβλητές απόφασης του πρώτου σταδίου $(u_g[h])^*$ και $(p_{FW}[h])^*$ εμπεριέχονται στο διάνυσμα x^* . Ο περιορισμός δευτέρου σταδίου (4.9) εξασφαλίζει ότι η μεταβολή στη παραγόμενη ενέργεια κάθε θερμικής μονάδας εντός μίας χρονικής περιόδου δεν ξεπερνά τα τεχνικά όρια. Ακολούθως ο περιορισμός (4.10) ορίζει τη μέγιστη ισχύ εξόδου για την κάθε ενταγμένη θερμική μονάδα παραγωγής. Ο περιορισμός (4.11) εξασφαλίζει ότι κατά τις συναλλαγές πραγματικού χρόνου δεν μπορεί να πωληθεί ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο αλλά μόνο να αγορασθεί. Τέλος το ισοζύγιο ενέργειας (4.12) εκφράζει ότι το σύνολο της αγορασθείσας ενέργειας (προθεσμιακό συμβόλαιο και το συμβόλαιο πραγματικού χρόνου), της ενέργεια από τις ενταγμένες θερμικές μονάδες καθώς επίσης και της αιολικής ενέργειας πρέπει να καλύπτει την ζήτηση ενέργειας κάθε ώρα.

$$F(x^*, l^v, w^v) := \min \left\{ \sum_{h \in H} \left[c_g^p p_g[h] + \kappa_{RT}[h] p_{RT}[h] \right] \right\} \quad (4.8)$$

$$RD_g \leq p_g[h] - p_g[h-1] \leq RU_g \quad (4.9)$$

$$0 \leq p_g[h] \leq (u_g[h]) * p_g^{max} \quad (4.10)$$

$$p_{RT}[h] \geq 0 \quad (4.11)$$

$$p_g[h] + (p_{FW}[h])^* + p_{RT}[h] \geq l^v[h] - w^v[h] \quad (4.12)$$

4.4 Μεθοδολογία Επίλυσης

Η μέθοδος L-shaped αποτελεί ένα αλγόριθμο για την επίλυση στοχαστικών προβλημάτων δύο σταδίων και είναι βασισμένη στην αποσύνθεση Benders (Bender decomposition). Κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η κατασκευή ενός κύριου προβλήματος (Master problem) το οποίο να περιλαμβάνει τις μεταβλητές πρώτου σταδίου (first stage variables) και αριθμού υποπροβλημάτων (Subproblem) με τις μεταβλητές δεύτερου σταδίου (second stage variables). Έτσι επιτυγχάνεται η χρονική απόζευξη μεταξύ αποφάσεων πρώτου και δεύτερου σταδίου, συγκεκριμένα σε πρώτο χρόνο γίνεται η επίλυση του master problem και ακολούθως γίνεται η επίλυση των υποπροβλημάτων με βάση τις αποφάσεις πρώτου σταδίου.

Περιγραφή Αλγορίθμου

Αρχικά κατασκευάζεται το master-problem το οποίο περιλαμβάνει την δυαδική μεταβλητή απόφασης $u_g[h]$ για την ένταξη της συμβατικής μονάδας του μικροδικτύου τη μεταβλητή $p_{FR}[h]$ για τον καθορισμό του ποσού ενέργειας που αγοράζει ο διαχειριστής του μικροδικτύου από την προθεσμιακή αγορά ενέργειας και τη μεταβλητή σύνδεσης με το sub-problem ϕ . Η αντικειμενική συνάρτηση του master problem έχει την εξής μορφή:

$$\min c_g^u * u_g[h] + p_{FW}[h] k_{FW} + \phi[h]$$

Την αντικειμενική συνάρτηση του κυρίως προβλήματος πλαισιώνουν περιορισμοί (4.2)-(4.5) που αφορούν τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας της θερμικής μονάδας, τον ελάχιστο χρόνο μη λειτουργίας της μονάδας και τον περιορισμό της μεταβλητής $p_{FW}[h]$ στις θετικές τιμές αφού επιτρέπεται μόνο η αγορά ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Ακόμη η μεταβλητή ϕ που αντιπροσωπεύει το κόστος δεύτερου σταδίου επίσης περιορίζεται στις θετικές τιμές για την πρώτη επανάληψη.

Ακολούθως μετά την πρώτη επίλυση του master problem κατασκευάζεται αριθμός υποπροβλημάτων ίσος με τον αριθμό των διαθέσιμων σεναρίων φορτίου και αιολικής παραγωγής.

Το κάθε ξεχωριστό υποπρόβλημα περιλαμβάνει τις μεταβλητές $u_g[h]$ και $p_{FW}[h]$ οι τιμές των οποίων προκαθορίζονται ανάλογα με τις αντίστοιχες αποφάσεις που προέκυψαν από την επίλυση του master problem. Επιπλέον μεταβλητές για το υποπρόβλημα είναι η $p_g[h]$ που καθορίζει την ισχύ εξόδου της θερμικής μονάδας και η μεταβλητή $p_{RT}[h]$ που αντιστοιχεί στο

ποσό ενέργειας που αγοράζει ο διαχειριστής του μικροδικτύου από το την αγορά πραγματικού χρόνου. Η αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος έχει την μορφή :

$$\min c_g^p p_g[h] + \kappa_{RT} p_{RT}[h]$$

Η αντικειμενική συνάρτηση του κάθε υποπροβλήματος που κατασκευάζεται υπόκειται στους περιορισμούς (4.7)-(4.12) που αφορούν το μέγιστο και ελάχιστο ρυθμό μεταβολής της ισχύος εξόδου της μονάδας παραγωγής, τη μέγιστη παραγωγή της μονάδας σύμφωνα με τα τεχνικά της χαρακτηριστικά και τη τήρηση του ισοζυγίου ενέργειας. Επιπρόσθετα οι περιορισμοί :

$$master.u_g[h] = sub.u_g[h] \quad (4.13)$$

$$master.p_{FW}[h] = sub.p_{FW}[h] \quad (4.14)$$

μεταβιβάζουν τις αποφάσεις του master problem στις αντίστοιχες μεταβλητές του υποπροβλήματος.

Μετά την επίλυση των N υποπροβλημάτων γίνεται ο έλεγχος σύγκλισης. Το άνω όριο προκύπτει από τα αποτελέσματα του υποπροβλήματος.

$$upper\ bound = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} c_g^u * u_g[h] + k_{FW} * p_{FW}[h] + c_g^p * p_g[h] + \kappa_{RT} * p_{RT}[h] \quad (4.15)$$

Αντίστοιχα το κάτω όριο υπολογίζεται από τις αποφάσεις του κυρίως προβλήματος.

$$lower\ bound = \sum_{h \in H} c_g^u * u_g[h] + k_{FW} * p_{FW}[h] + \varphi[h] \quad (4.16)$$

Στη συνέχεια αν η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται.

$$if (upper\ bound - lower\ bound < \varepsilon) \rightarrow terminate$$

Αν η παραπάνω συνθήκη είναι ψευδής τότε η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται προσθέτοντας στο κυρίως πρόβλημα ένα περιορισμό βελτιστοποίησης για την μεταβλητή $\varphi[h]$ που συνδέει τα δύο προβλήματα.

Για την κατασκευή του περιορισμού βελτιστοποίησης γίνεται χρήση των δυικών τιμών (dual values) που αντιστοιχούν στους περιορισμούς του υποπροβλήματος που αφορούν τις μεταβλητές πρώτου σταδίου.

(Για γραμμικά προβλήματα η δυική τιμή που σχετίζεται με ένα περιορισμό ορίζεται ως η μεταβολή που θα επιφέρει στη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος μια αλλαγή στο δεξί σκέλος του αντίστοιχου περιορισμού. Αν η δυική τιμή ενός περιορισμού είναι μηδενική συνεπάγεται ότι ο περιορισμός είναι ανενεργός. Ένας περιορισμός θεωρείται ενεργός όταν

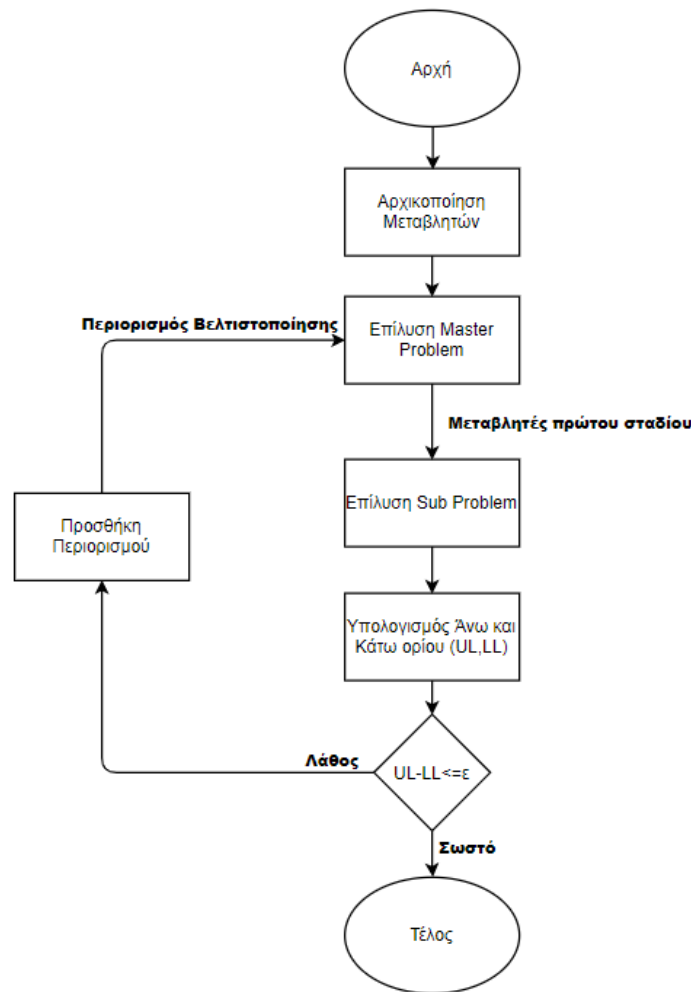
περιορίζει την περαιτέρω βελτιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Η ταυτοποίηση των ενεργών περιορισμών σε ένα πρόβλημα είναι πολύ σημαντική καθώς παρέχει την πληροφορία για το ποιοι περιορισμοί θα πρέπει να χαλαρώσουν ούτως ώστε να υπάρξει περαιτέρω βελτιστοποίηση.)

Ο περιορισμός βελτιστοποίησης περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1}{N} \sum_{n \in N} c_g^p * p_g^{results}[h] + k_{RT} * p_{RT}^{results}[h] + u^{dual} * (u_g[h] - u_g^{results}[h]) + p_{FW}^{dual}(p_{FW}[h] - p_{FW}^{results}[h]) \leq \varphi[h]$$

όπου $p_g^{results}[h], p_{RT}^{results}[h], u_g^{results}[h], p_{FW}^{results}[h]$ οι τιμές των μεταβλητών που προέκυψαν στη προηγούμενη επανάληψη και u^{dual}, p_{FW}^{dual} οι δυικές τιμές που αντιστοιχούν στους περιορισμούς (4.13),(4.14) αντίστοιχα.

Η μέθοδος L-share περιγράφεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1 L-Shaped method

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5.1 Κατασκευή σεναρίων

Για την παραγωγή των διαφόρων σεναρίων του προβλήματος έγινε η εφαρμογή τη μεθόδου Μόντε Κάρλο. Η μέθοδος Μόντε Κάρλο ή αλλιώς προσομοίωση Μόντε Κάρλο αποτελεί μία στοχαστική διαδικασία η οποία βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για την επίλυση ενός προβλήματος. Βασική ιδέα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η εξαγωγή των αποτελεσμάτων με τη χρήση ενός συνόλου τυχαίων δειγμάτων και στατιστικής ανάλυσης. Η μέθοδος Μόντε Κάρλο χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα βελτιστοποίησης και προβλήματα αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια τυχαίων δειγμάτων που ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η γεννήτρια τροφοδοτείται με ένα διάνυσμα το οποίο περιέχει τη μέση τιμή του αναμενόμενου φορτίου για κάθε ώρα της μέρας για την οποία εκτελείται η προσομοίωση. Για κάθε μέση τιμή η γεννήτρια υπολογίζει αριθμό τυχαίων δειγμάτων με διακύμανση το 25% της μέσης τιμής, με αυτό το τρόπο δημιουργείται ανάλογος αριθμός σεναρίων για το ύψος του φορτίου κάθε ώρας (για την παραγωγή των σεναρίων έγινε η παραδοχή ότι κάθε τιμή φορτίου είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες ώρες).

Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και για την παραγωγή των σεναρίων παραγωγής από το αιολικό πάρκο του μικροδικτύου. Οι μέσες τιμές για το ωριαίο φορτίο αλλά και την αιολική παραγωγή αναγράφονται στους πίνακες Πίνακας 5-1 και Πίνακας 5-2 αντίστοιχα.

Time[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
l[h]	55.45	48.59	42.12	46.85	46.08	47.54	52.62	60.21	61.52	59.77	55.68	51.15

Time[h]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
l[h]	47.28	46.80	46.15	49.76	55.06	61.86	70.01	73.40	72.72	68.35	61.89	58.55

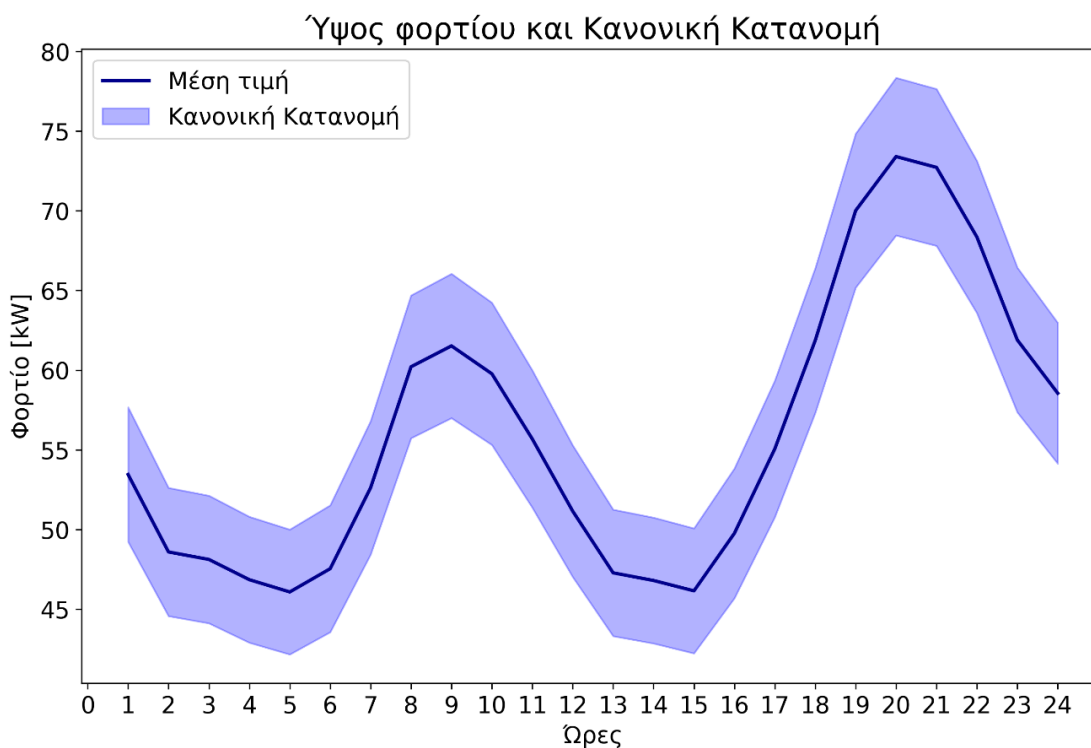
Πίνακας 5-1 Μέση τιμή φορτίου ανά ώρα

Time[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
w[h]	16.99	16.85	16.28	15.75	15.30	15.35	15.77	16.76	17.90	19.52	20.38	20.99

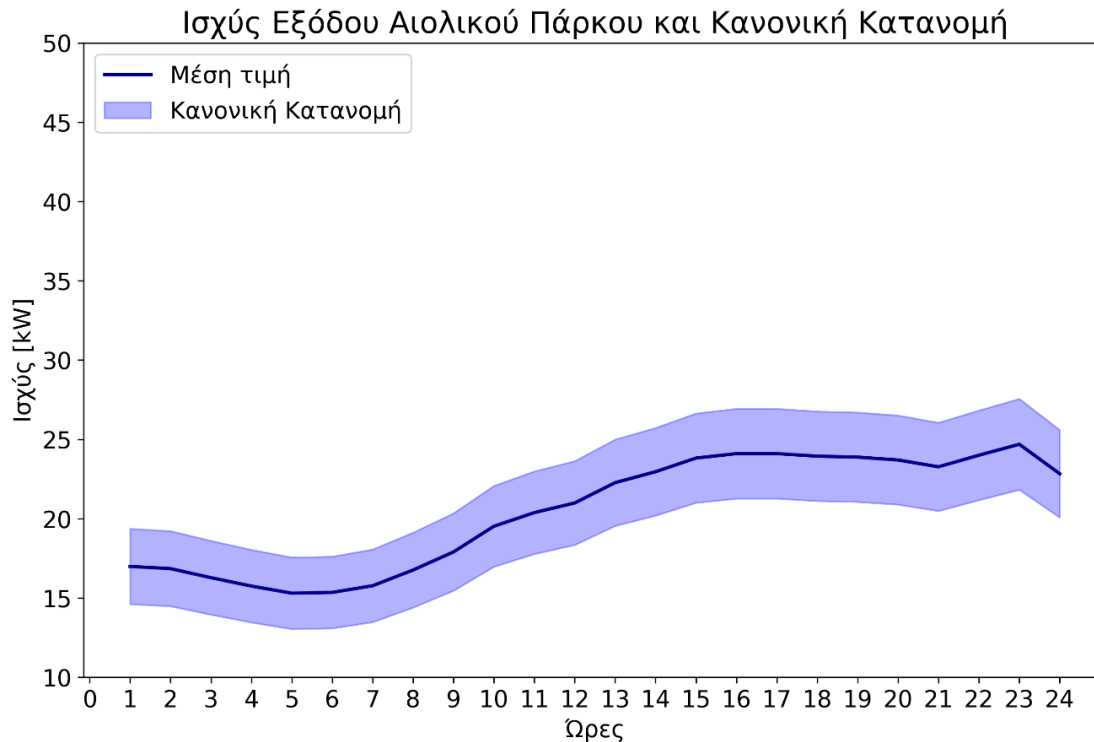
Time[h]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
w[h]	22.27	22.96	23.82	24.10	24.10	23.94	23.88	23.70	23.27	24.00	24.69	22.83

Πίνακας 5-2 Μέση τιμή αιολικής παραγωγής ανά ώρα

Το Γράφημα 5-1 που ακολουθεί απεικονίζει το ωριαίο προφίλ φορτίου που σχηματίστηκε, σημειώνοντας τόσο τη μέση τιμή φορτίου για κάθε ώρα αλλά και το περιθώριο γύρω από αυτή στο οποίο γίνεται η τυχαία δειγματοληψία. Παρόμοια το Γράφημα 5-2 απεικονίζει το προφίλ αιολικής παραγωγής που σχηματίστηκε.



Γράφημα 5-1 Προφίλ Φορτίου



Γράφημα 5-2 Προφίλ Αιολικής Παραγωγής

5.2 Case Study

Όπως προαναφέρθηκε στόχος μας είναι η κατασκευή ενός στοχαστικού μοντέλου ένταξης μονάδων παραγωγής δύο σταδίων και η σύγκριση της απόδοσης του με την αντίστοιχη ντετερμινιστική προσέγγιση του προβλήματος.

Ξεκινώντας από τη στοχαστική προσέγγιση του προβλήματος τροφοδοτούμε το μοντέλο με 100 σενάρια φορτίου και αιολικής παραγωγής τα οποία κατασκευάζονται σύμφωνα με τη μέθοδο που περιεγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ακολούθως, το ντετερμινιστικό μοντέλο τροφοδοτείται μόνο με ένα διάνυσμα το οποίο περιέχει τη μέση τιμή φορτίου και αιολικής παραγωγής για τις 24 ώρες του προβλήματος.

Στη συνέχεια τα δύο μοντέλα προσεγγίζουν τις βέλτιστες αποφάσεις πρώτου σταδίου που αφορούν τη συμμετοχή του μικροδικτύου στην προθεσμιακή αγορά αλλά και την δέσμευση των αναγκαίων θερμικών μονάδων.

Τέλος, δημιουργείται το μοντέλο ελέγχου, το οποίο τροφοδοτείται με τις αποφάσεις πρώτου σταδίου που προέκυψαν από τις δύο προσεγγίσεις: **α)** το ποσό ενέργειας ανά ώρα που αγοράζεται από την προθεσμιακή αγορά ενέργειας και **β)** το πίνακα με τις δεσμευμένες μονάδες παραγωγής. Κρατώντας τις τιμές αυτές αμετάβλητες, το μοντέλο ελέγχου υπολογίζει τις μεταβλητές δευτέρου σταδίου για 100 νέα σενάρια φορτίου και αιολικής παραγωγής.

Αφού γίνει ο υπολογισμός όλων των μεταβλητών δευτέρου σταδίου καταλήγουμε στο συνολικό κόστος ενέργειας που προκύπτει από τις αποφάσεις του στοχαστικού και του ντετερμινιστικού μοντέλου τα οποία και συγκρίνουμε.

5.2.1 Παράμετροι

Το μικροδίκτυο συνδέεται μονόδρομα με το κεντρικό δίκτυο και έχει τη δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω προθεσμιακών συμβολαίων στην τιμή των $\kappa_{FW} = 0.25\text{€/kWh}$. Επιπρόσθετα το μικροδίκτυο μπορεί να συναλλάζεται ενέργεια με το ανάντη δίκτυο σε πραγματικό χρόνο, η τιμή πώλησης της ενέργειας στην ενδοημερήσια αγορά διπλασιάζεται και φτάνει τα $\kappa_{RT} = 0,5\text{€/kWh}$. Το μικροδίκτυο διαθέτει επίσης μία μικρή θερμική μονάδα παραγωγής ενέργειας ονομαστικής ισχύος $p_g = 20\text{ kW}$. Η θερμική μονάδα μπορεί να αυξομειώσει την ισχύ εξόδου της με ρυθμό $RU_g = RD_g = 10\text{ kW/h}$. Το γραμμικό κόστος κατανάλωσης καυσίμου της μονάδας ορίζεται στα $c_g^p = 0.128\text{ €/kWh}$, τέλος το σταθερό κόστος λειτουργίας της μονάδας ανέρχεται στα $c_g^u = 0.002\text{€/h}$.

Αριθμός Θερμικών Μονάδων	$Unit_{no} = 1$
Ονομαστική Ισχύς Θερμικής Μονάδας	$P_1^{max} = 20\text{ kW}$
Ρυθμός Αύξησης Ισχύος Μονάδας	$RU_1 = 10\text{ kW/h}$
Ρυθμός Μείωσης Ισχύος Μονάδας	$RD_1 = 10\text{ kW/h}$
Γραμμικό Κόστος Παραγωγής	$c_1^p = 0.128\text{€/kWh}$
Σταθερό Κόστος Παραγωγής	$c_1^u = 0.002\text{€/h}$
Κόστος ενέργειας σε Αγορά Πραγματικού Χρόνου	$\kappa_{RT} = 0,5\text{ €/kWh}$
Κόστος ενέργειας σε Αγορά Προηγούμενης Μέρας	$\kappa_{FW} = 0.25\text{€/kWh}$

Πίνακας 5-3 Παράμετροι Μοντέλου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα από την ντετερμινιστική σκοπιά. Τροφοδοτούμε δηλαδή το μοντέλο με τις μέσες ωριαίες τιμές πρόβλεψης φορτίου και αιολικής ενέργειας καταλήγουμε στις αποφάσεις του Πίνακα 6-1. Οι αποφάσεις αυτές αφορούν τις αποφάσεις ένταξης της θερμικής μονάδας και τα ποσά ενέργειας που πρόκειται να αγοραστούν μέσω προθεσμιακών συμβολαίων για κάθε ώρα.

<i>Time[h]</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$u_1[h]$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$p_{FW}[kWh]$	26,46	11,74	11,84	11,10	10,78	12,19	16,85	23,45	23,62	20,25	15,30	10,16

<i>Time[h]</i>	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$u_1[h]$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$p_{FW}[kWh]$	05,01	03,84	02,33	05,66	10,96	17,92	26,13	29,70	29,45	24,35	17,20	15,72

Πίνακας 6-1 Αποφάσεις Πρώτου Σταδίου - Ντετερμινιστικό Μοντέλο

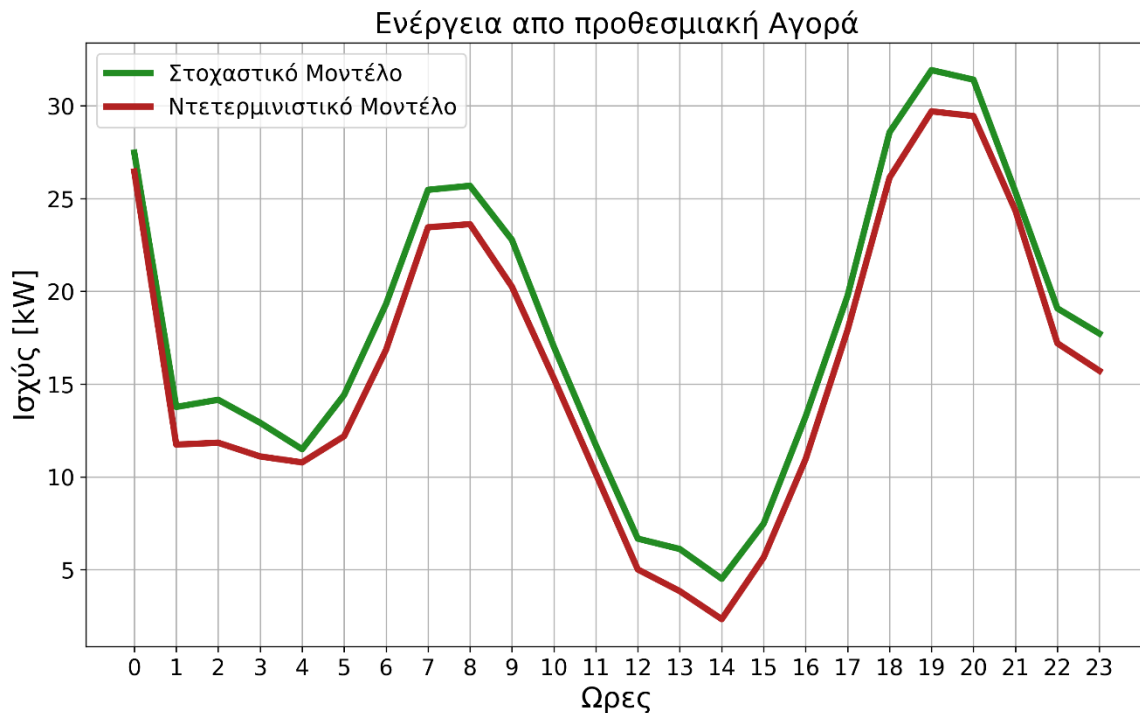
Ακολούθως, προσεγγίζοντας το πρόβλημα στοχαστικά τροφοδοτούμε το μοντέλο με τα 100 σενάρια πρόβλεψης φορτίου και αιολικής παραγωγής που κατασκευάστηκαν. Οι αποφάσεις λειτουργίας πρώτου σταδίου για το μικροδίκτυο που προέκυψαν από το στοχαστικό μοντέλο βρίσκονται στο Πίνακα 6-2.

<i>Time[h]</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$u_1[h]$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$p_{FW}[kWh]$	27,48	13,77	14,16	15,91	11,49	14,41	19,31	25,47	25,69	22,78	17,01	11,71

<i>Time[h]</i>	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$u_1[h]$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$p_{FW}[kWh]$	06,67	06,11	04,50	07,48	13,25	19,76	28,57	31,92	31,40	25,35	19,08	17,73

Πίνακας 6-2 Αποφάσεις Πρώτου Σταδίου - Στοχαστικό Μοντέλο

Συγκρίνοντας τα ποσά ενέργειας που το κάθε μοντέλο αποφασίζει ότι θα πρέπει να αγοραστούν μέσω της προθεσμιακής αγοράς ενέργειας, παρατηρούμε ότι το στοχαστικό μοντέλο καταλήγει να προτείνει την αγορά μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας από την προθεσμιακή αγορά καθ' όλη τη διάρκεια του ημερήσιου προγραμματισμού. Για να γίνει πιο εύκολη η οπτική παρατήρηση της διαφοράς στις αποφάσεις των δύο μοντέλων όσον αφορά τα προθεσμιακά συμβόλαια αγοράς ενέργειας κατασκευάζεται το Γράφημα 6-1 που ακολουθεί.



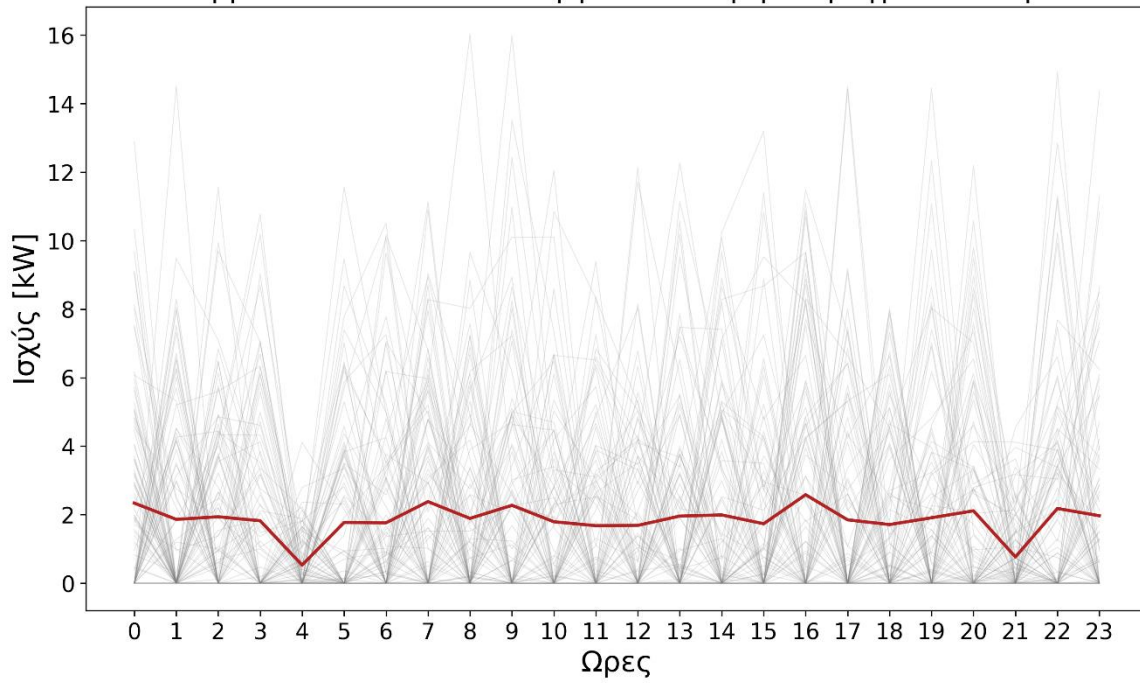
Γράφημα 6-1 Ενέργεια από προθεσμιακή Αγορά

Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα είναι εμφανές ότι το στοχαστικό μοντέλο επιλέγει να αγοράσει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από την φθηνότερη προθεσμιακή αγορά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του μικροδικτύου. Πιο συγκεκριμένα αθροίζοντας τα ποσά ενέργειας για κάθε ώρα προκύπτει ότι το ντετερμινιστικό μοντέλο καταλήγει στη αγορά ποσότητας ενέργειας ύψους $382,01 kWh$ και το στοχαστικό μοντέλο $428,04 kWh$.

Συνεχίζουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξετάζοντας την συμπεριφορά των δύο μοντέλων για κάθε ένα από τα 100 σενάρια ελέγχου που κατασκευάστηκαν. Προκαθορίζοντας λοιπόν τις μεταβλητές πρώτου σταδίου που προκύπτουν από τα δύο μοντέλα (Πίνακας 6-1, Πίνακας 6-2), το μοντέλο ελέγχου τηρώντας τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης καθορίζει τις τιμές για τις μεταβλητές δεύτερου σταδίου του προβλήματος. Για κάθε ένα από τα σενάρια ελέγχου προκύπτουν οι τιμές των μεταβλητών δεύτερου σταδίου, ακολούθως υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της κάθε μεταβλητής για να καταλήξουμε στα συμπεράσματά μας για την συνολική απόδοση του κάθε μοντέλου. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης όλα τα σενάρια θεωρούνται ισοτίθανα.

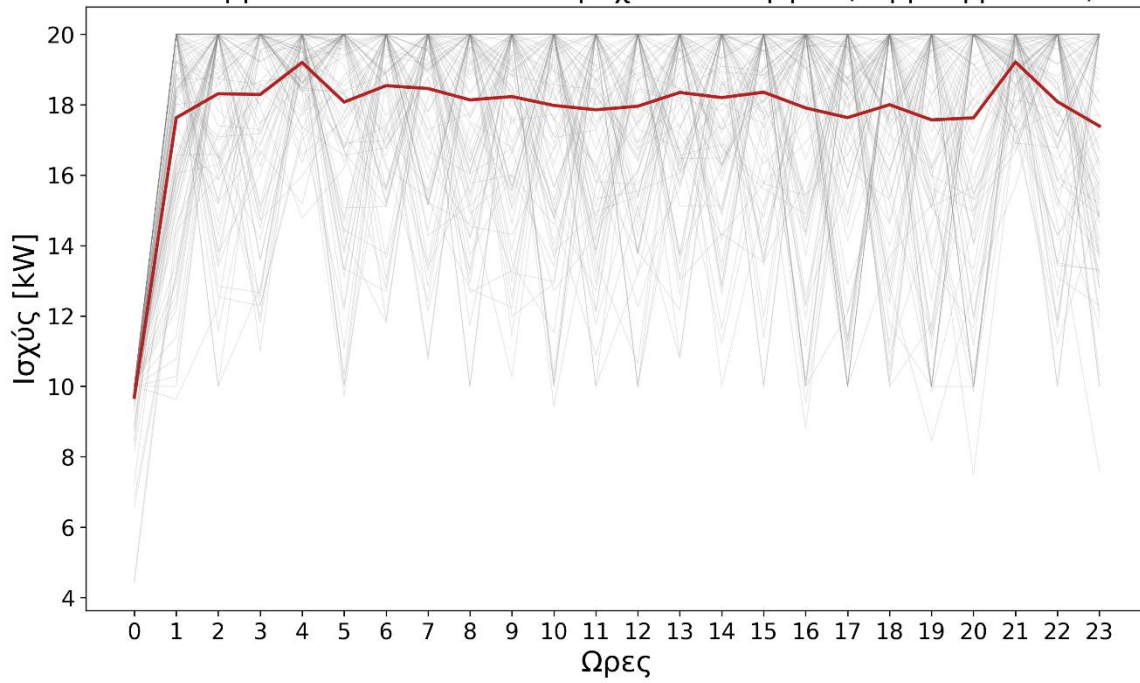
Στο Γράφημα 6-2 και Γράφημα 6-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του που προκύπτουν από τις αποφάσεις του ντετερμινιστικού μοντέλου. Στο πρώτο γράφημα παρουσιάζονται με ελαφρύ γκρι χρώμα οι συμμετοχές του μικροδικτύου στην αγορά πραγματικού χρόνου και με σκούρο κόκκινο χρώμα σχηματίζεται η μέση ποσότητα ενέργεια που αγοράζεται ανά ώρα.

Ντετερμινιστικό Μοντέλο-Ενέργεια απο Αγορά Πραγματικού Χρόνου



Γράφημα 6-2 Ντετερμινιστικό Μοντέλο - Αγορά Πραγματικού Χρόνου

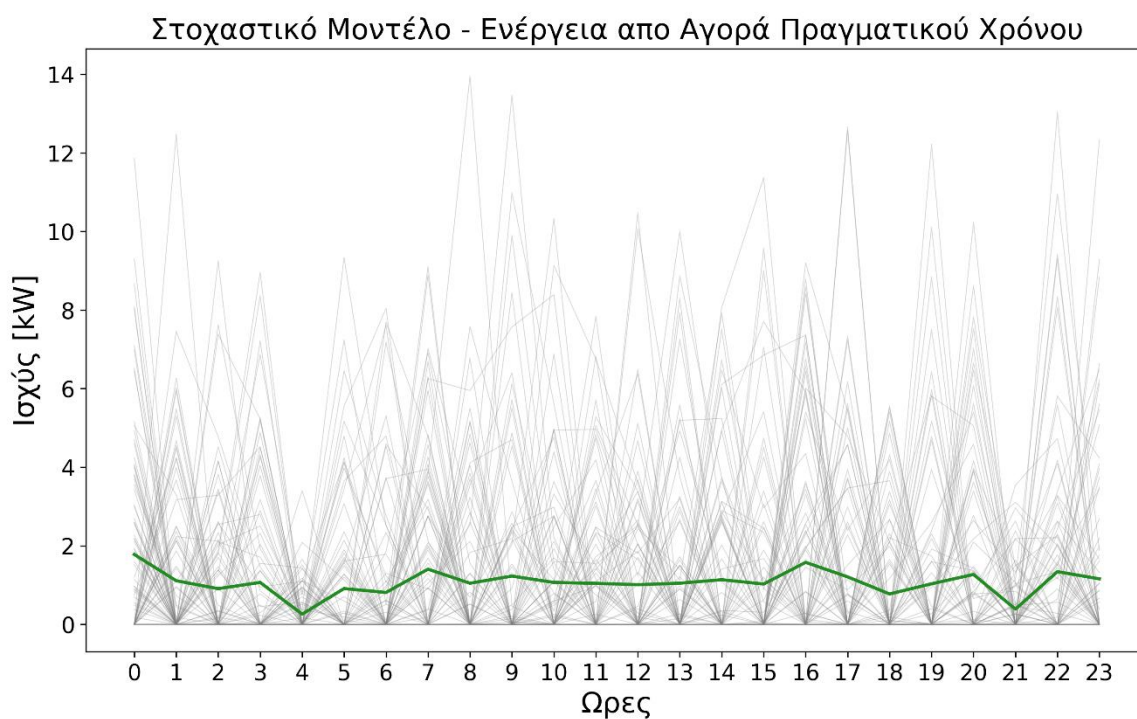
Ντετερμινιστικό Μοντέλο - Παραχθείσα ενέργεια(θερμική μονάδα)



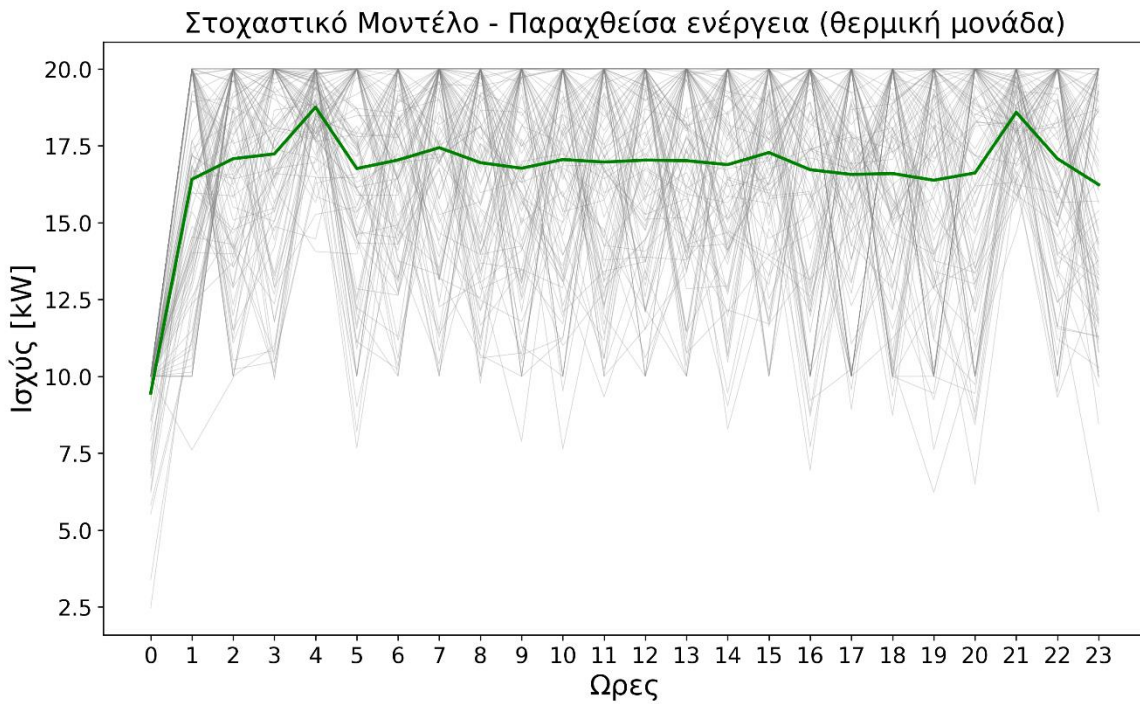
Γράφημα 6-3 Ντετερμινιστικό Μοντέλο - Θερμική Μονάδα Παραγωγής

Το Γράφημα 6-3 παρουσιάζει τη λειτουργία της θερμικής μονάδας του μικροδικτύου για κάθε ένα από τα σενάρια ελέγχου με ελαφρύ γκρι χρώμα και με σκούρο κόκκινο χρώμα διαγράφεται η μέση ισχύς εξόδου της γεννήτριας που προκύπτει από όλα τα σενάρια. Υπενθυμίζουμε ότι η μέγιστη ισχύς εξόδου της μονάδας ορίσθηκε στα 20 kW με μέγιστο ρυθμό μεταβολής τα 10 kW/h.

Παρόμοια με το ντετερμινιστικό μοντέλο παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από το στοχαστικό μοντέλο στο Γράφημα 6-4 και Γράφημα 6-5 που ακολουθούν.



Γράφημα 6-4 Στοχαστικό Μοντέλο - Αγορά Πραγματικού Χρόνου



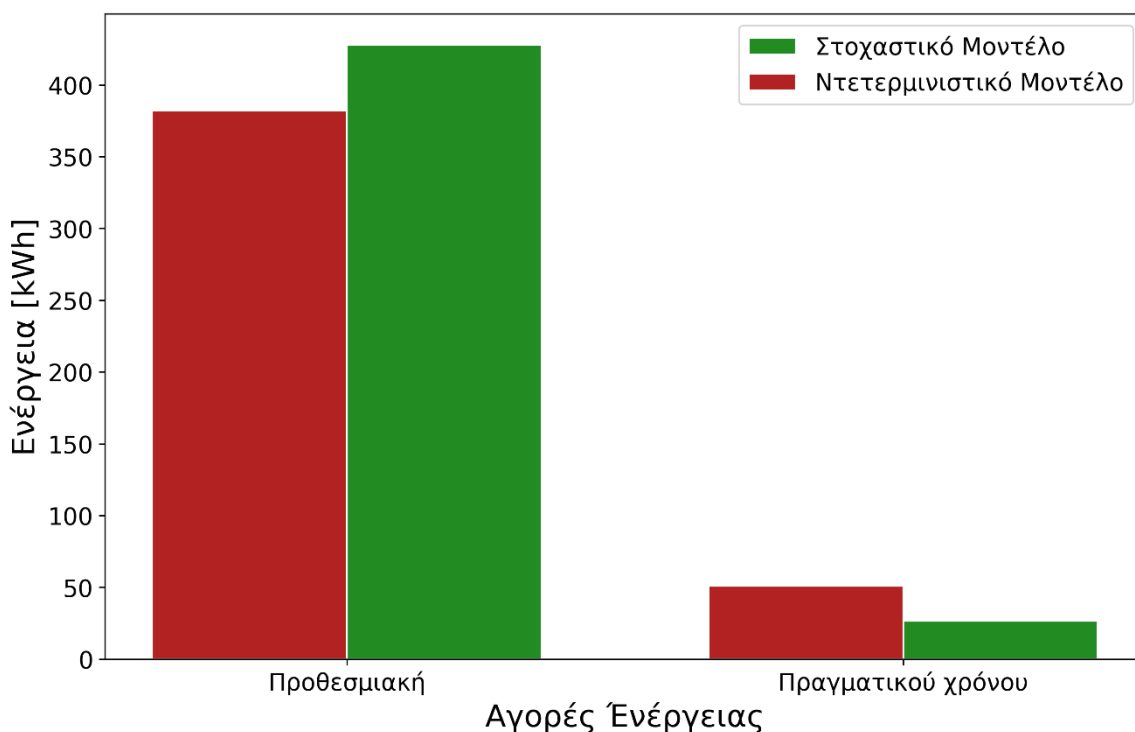
Γράφημα 6-5 Στοχαστικό Μοντέλο - Θερμική Μονάδα Παραγωγής



Γράφημα 6-6 Αγορά Πραγματικού Χρόνου (Στοχαστικό & Ντετερμινιστικό)

Τοποθετώντας την ωριαία μέση ποσότητα ενέργειας που αγοράστηκε στην αγορά πραγματικού χρόνου και στα δύο μοντέλα προκύπτει το Γράφημα 6-6. Παρατηρούμε ότι το στοχαστικό μοντέλο διαχειρίζεται καλύτερα τους ενεργειακούς πόρους του μικροδικτύου αφού καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει τα ποσά ενέργειας που αγοράζονται από την ακριβή αγορά πραγματικού χρόνου. Καθ' όλη τη διάρκεια του ημερήσιου προγραμματισμού το στοχαστικό μοντέλο αγοράζει μικρότερες ποσότητες ενέργειας αφού έχει στη διάθεση του μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας αγορασμένες από την φθηνότερη προθεσμιακή αγορά.

Αθροίζοντας λοιπόν τα ποσά ενέργειας που αγοράσθηκαν όλο το εικοσιτετράωρο μέσω της προθεσμιακής αγοράς ενέργειας και της αγοράς πραγματικού χρόνου στα δύο μοντέλα προκύπτει το παρακάτω Γράφημα 6-7.

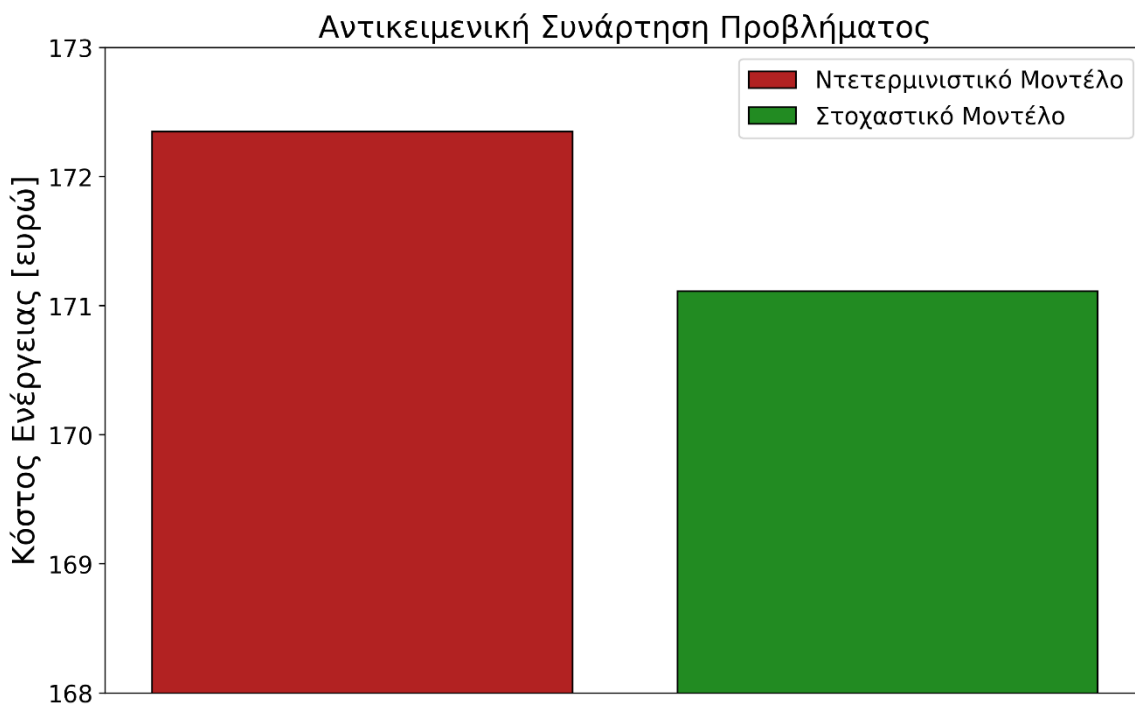


Γράφημα 6-7 Προθεσμιακά Συμβόλαια & Συμβόλαια Πραγματικού Χρόνου

Πιο συγκεκριμένα το συνολικό ποσό ενέργειας που αγοράσθηκε μέσω της προθεσμιακής αγοράς ενέργειας από το ντετερμινιστικό και το στοχαστικό μοντέλο ανέρχεται στις 382,01kWh και 428,04 kWh αντίστοιχα. Όσον αφορά την αγορά πραγματικού χρόνου, το ντετερμινιστικό μοντέλο συναλλάσσεται συνολική ενέργεια ύψους 44,48 kWh και το στοχαστικό μοντέλο ενέργεια ύψους 25,58 kWh. Συμπερασματικά, η μειωμένη ζήτηση που παρουσιάζει το στοχαστικό μοντέλο στην αγορά ενέργειας πραγματικού χρόνου οφείλεται στην ικανότητα του να προβλέπει με περισσότερη ακρίβεια τις μελλοντικές του ενεργειακές ανάγκες και να προμηθεύεται τα ανάλογα ποσά ενέργειας στη μισή τιμή από την προθεσμιακή αγορά. Η

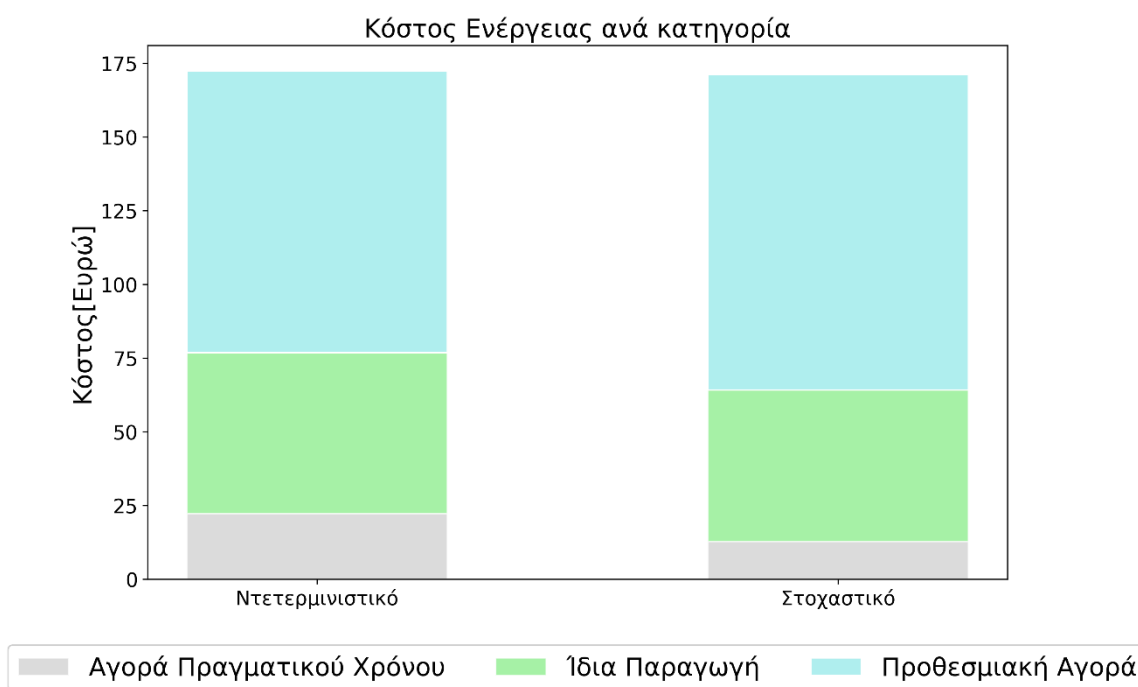
ικανότητα του στοχαστικού μοντέλου να προμηθεύεται όσο το δυνατό λιγότερα ποσά ενέργειας από την ακριβοπληρωμένη αγορά πραγματικού χρόνου αποτυπώνεται στο μειωμένο συνολικό παραγωγής ενέργειας.

Ένα από τα σημαντικότερα γραφήματα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων αποτελεί το Γράφημα 6-8 το οποίο απεικονίζει το ποσό που ανήλθε το συνολικό κόστος για κάθε μία από τις δύο εκδοχές του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας με βάση το προγραμματισμό λειτουργίας που προκύπτει από το ντετερμινιστικό μοντέλο ανέρχεται στα 172,35€. Όταν όμως οι αποφάσεις λειτουργίας του μικροδικτύου λαμβάνονται από το στοχαστικό μοντέλο το μέσο κόστος παραγωγής ενέργειας ανέρχεται στα 171,11€. Παρατηρούμε συγκεκριμένα μια μείωση στο συνολικό μέσο κόστος παραγωγής της τάξης του 1%. Το ποσοστό αυτό μπορεί εύκολα να αυξηθεί ανάλογα με το βαθμό εξάρτησης του μικροδικτύου από το κυρίως δίκτυο. Σε περιπτώσεις όπου τα ποσά ενέργειας που αγοράζονται από το ανάντη δίκτυο είτε μέσω της αγοράς προηγούμενης μέρας είτε μέσω της αγοράς πραγματικού χρόνου είναι μειωμένα τότε και τα περιθώρια βελτιστοποίησης του στοχαστικού μοντέλου επίσης μειώνονται. Επιπρόσθετα το στοχαστικό μοντέλο μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε ακραία σενάρια υψηλής διακύμανσης φορτίου αλλά και παραγωγής ΑΠΕ.



Γράφημα 6-8 Αντικειμενική Συνάρτηση Προβλήματος

Τέλος ολοκληρώνουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων με το Γράφημα 6-9 στο οποίο απεικονίζεται το κόστος ενέργειας για κάθε μία από τις αγορές που συμμετέχει το μικροδίκτυο. Παρατηρούμε ότι το στοχαστικό μοντέλο επιτυχημένα μειώνει το ποσό ενέργειας που αναγκάζεται να αγοράσει ο διαχειριστής του μικροδικτύου από την αγορά πραγματικού χρόνου στο μισό. Επιπρόσθετα το στοχαστικό μοντέλο δεν αποτυγχάνει να προβλέψει εκ των προτέρων τα ποσά ενέργειας που πρόκειται να χρειαστεί από το κυρίως δίκτυο έτσι ώστε να προβεί στην προκαταβολική αγορά της ενέργειας με πιο ευνοϊκούς όρους.. Τέλος η θερμική μονάδα παραγωγής του μικροδικτύου λειτουργεί κοντά στο μέγιστο των δυνατοτήτων της για σημαντικό μέρος του ημερήσιου προγραμματισμού αφού αποτελεί και την φθηνότερη πηγή ενέργειας για το μικροδίκτυο.



Γράφημα 6-9 Κόστος Ενέργειας ανά κατηγορία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία προτείνεται ένα στοχαστικό μοντέλο βέλτιστης ένταξης για το προγραμματισμό λειτουργίας ενός μικροδικτύου. Το μοντέλο καλείται να αντιμετωπίσει τόσο το ευμετάβλητο φορτίο του μικροδικτύου όσο και τη μεγάλη αβεβαιότητα στην πλευρά της παραγωγής λόγω των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας του μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο λειτουργεί διασυνδεδεμένο στο κυρίως δίκτυο με δυνατότητα συμμετοχής στην προθεσμιακή αγορά ενέργειας αλλά και στην αγορά πραγματικού χρόνου του κυρίως δικτύου. Για την επίλυση του μοντέλου γίνεται εφαρμογή της μεθόδου L-shape η οποία επιτρέπει την παράλληλη επίλυση των σεναρίων του προβλήματος με σημαντικές βελτιώσεις στην ταχύτητα επίλυσης.

Φτάνοντας στο τέλος της παρούσας μελέτης και αναλύοντας τα αποτελέσματα, τα πλεονεκτήματα του στοχαστικού μοντέλου έναντι του ντετερμινιστικού είναι εμφανή αφού παρατηρούμε περεταίρω βελτιστοποίηση του προβλήματος. Τροφοδοτώντας το μοντέλο ελέγχου με τις αποφάσεις πρώτου σταδίου που προέκυψαν από την στοχαστική και την ντετερμινιστική προσέγγιση του προβλήματος, παρατηρούμε ότι για ένα νέο σύνολο σεναρίων το συνολικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής που προκύπτει από τις αποφάσεις της στοχαστικής προσέγγισης είναι πιο χαμηλό.

Οι παραδοσιακές ντετερμινιστικές προσεγγίσεις δεν είναι επαρκείς για να αντιμετωπίσουν τις αβεβαιότητες που συναντώνται στα μοντέρνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Εξ ορισμού τα στοχαστικά μοντέλα βελτιστοποίησης απευθύνονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης τα οποία περιέχουν κάποιας μορφής αβεβαιότητα. Η πλειοψηφία των προβλημάτων που συναντώνται στο πραγματικό κόσμο εξαρτάται από κάποιου είδους τυχαία γεγονότα. Συνεπώς η επίλυση τέτοιων προβλημάτων με μονοσήμαντα ορισμένες παραμέτρους πολλές φορές δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Τέλος, η σωστή επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων και η κατασκευή αντιπροσωπευτικών σεναρίων που να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα κρίνεται ως υψίστης σημασίας. Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν είναι βασισμένα στα σενάρια με τα οποία τροφοδοτείται το μοντέλο, συνεπώς αν τα σενάρια αυτά δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και η πρόβλεψη των τυχαίων μεταβλητών δεν είναι ακριβής ο αντίκτυπος θα είναι εμφανής στην ποιότητα των αποτελεσμάτων.

7.2 Επεκτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει μια ισχυρή βάση για περαιτέρω μελέτη και εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων σχετικά με το προγραμματισμό λειτουργίας και τη διαχείριση των μικροδικτύων. Ακολούθως προτείνονται πιθανές επεκτάσεις που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο μοντέλο μεταγενέστερα για περεταίρω εμβάθυνση στο συγκεκριμένο θέμα. Οι προτεινόμενες επεκτάσεις κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, τις επεκτάσεις που αφορούν τους επιπλέον περιορισμούς του δικτύου, κάποιες επεκτάσεις σε σχέση με την ίδια τη δομή του μικροδικτύου και τέλος τις επεκτάσεις που αφορούν την επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος.

Περιορισμοί δικτύου

- Μια σημαντική προσθήκη στους περιορισμούς του δικτύου θα ήταν η πρόβλεψη της απαραίτητης εφεδρείας για την κάλυψη τυχόν βίαιων διακυμάνσεων στην παραγόμενη ισχύ από ΑΠΕ.
- Στη παρούσα υλοποίηση το μοντέλο επιλύεται για ένα μοναδικό κόμβο δικτύου. Σημαντική επέκταση θα ήταν η ενσωμάτωση περισσότερων κόμβων στο δίκτυο έτσι ώστε να προστεθούν περιορισμοί σχετικά με τη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς για κάθε γραμμή και περιορισμοί τήρησης του ισοζυγίου ενέργειας σε κάθε κόμβο.

Μικροδίκτυο

- Κύριο δομικό συστατικό για τα μικροδίκτυα αποτελούν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία επιτρέπουν στο μικροδίκτυο να έχει περισσότερη ευελιξία όσο αφορά την διαχείριση των ενεργειακών του πόρων. Για τη πλήρη απαλοιφή των περιορισμών που σχετίζονται με τη διείσδυση των ΑΠΕ η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας κρίνεται απαραίτητη. Η προσθήκη λοιπόν ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στο υπάρχον μοντέλο θα αποτελούσε μια ενδιαφέρουσα προσθήκη.
- Το μικροδίκτυο επικοινωνεί μονόδρομα με το ανάντη δίκτυο, μια σημαντική επέκταση στη παρούσα εκτέλεση θα ήταν η δυνατότητα αμφίδρομης συναλλαγής ενέργειας με το κυρίως δίκτυο. Με αυτό το τρόπο σε περιπτώσεις περίσσειας ενέργειας το μικροδίκτυο θα επωφελείται από την πώληση της ενέργειας αυτής. Το μικροδίκτυο μπορεί να βρεθεί συχνά σε τέτοιες καταστάσεις λόγω του σημαντικά πιο ευμετάβλητου φορτίου αλλά και των μεγάλων διακυμάνσεων στην παραγωγή ενέργειας που προκαλεί η γεωγραφική εγγύτητα των μονάδων ΑΠΕ.
- Με βάση τους περιορισμούς του μοντέλου δεν ορίζεται κάποιο άνω όριο στα ποσά ενέργειας που μπορούν να αγοραστούν από το ανάντη δίκτυο. Για πιο ακριβή αποτελέσματα τα ποσά ενέργειας που συναλλάσσονται ανά ώρα θα πρέπει να περιορίζονται ανάλογα με τη δυνατότητες της διασύνδεσης μεταξύ των δύο δικτύων.

Δεδομένα

- Μια σημαντική επέκταση για το μοντέλο θα ήταν η καταγραφή δεδομένων από ένα πραγματικό μικροδίκτυο και η επεξεργασία τους έτσι ώστε τα σενάρια με τα οποία τροφοδοτείται το μοντέλο να αφορούν συγκεκριμένη υπαρκτή εφαρμογή μικροδικτύου.
- Στην παρούσα εφαρμογή ο αριθμός των σεναρίων που παράγεται είναι αρκετά μεγάλος, γεγονός που σε πραγματικές συνθήκες θα καθιστούσε την επίλυση του προβλήματος πολύ χρονοβόρα και αρκετά απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ. Συνεπώς η περαιτέρω επεξεργασία των σεναρίων με στόχο την μείωση του υπολογιστικού φόρτου κρίνεται αρκετά σημαντική κυρίως όταν πρόκειται για πραγματικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Mohammed, S. S. Refaat, S. Bayhan, and H. Abu-Rub, "AC Microgrid Control and Management Strategies: Evaluation and Review," *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 18–31, Jun. 2019, doi: 10.1109/MPEL.2019.2910292.
- [2] M. H. Saeed, W. Fangzong, B. A. Kalwar, and S. Iqbal, "A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166502–166517, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135083.
- [3] D. T. Ton and M. A. Smith, "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative," *Electr. J.*, vol. 25, no. 8, pp. 84–94, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.tej.2012.09.013.
- [4] M. Stadler and A. Naslé, "Planning and implementation of bankable microgrids," *Electr. J.*, vol. 32, no. 5, pp. 24–29, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.tej.2019.05.004.
- [5] "Microgrid." Wikipedia. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microgrid>
- [6] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, and M. Datta, "Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures—A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144730–144766, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014977.
- [7] D. E. Olivares *et al.*, "Trends in Microgrid Control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [8] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Οδηγία 96/92/ΕΚ σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας," *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 0020–0029, Jan. 30, 1997.
- [9] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Οδηγία 2003/54/ΕΚ, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας," *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 0037–0056, Jul. 15, 2003.
- [10] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Οδηγία 2009/72/ΕΚ, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας," *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 0055–0093, Aug. 14, 2009.
- [11] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 713/2009, για την ίδρυση Οργανισμού Συνεργασίας των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας," *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 0001–0014, Aug. 14, 2009.
- [12] "Energy policy: general principles." [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/68/energy-policy-general-principles>
- [13] Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας Α.Ε., "Κανονισμός Λειτουργίας της Αγοράς Επόμενης Ημέρας & Ενδοημερήσιας Αγοράς, Έκδοση 1.5." Sep. 12, 2021. [Online]. Available: <https://www.enexgroup.gr/el/web/guest/trading-rulebooks>
- [14] "Νόμος 2773/1999 - ΦΕΚ 286/Α/22-12-1999, Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις," *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, Dec. 22, 1999.
- [15] "Νόμος 4001/2011 - ΦΕΚ 179/Α/22-8-2011, Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου. Ενότητα Α'," *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, Aug. 22, 2011.
- [16] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Οδηγία (ΕΕ) 2019/944 σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας," pp. 125–199, Jun. 14, 2019.

- [17] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, “Κανονισμός (ΕΕ) 2019/942 για την ίδρυση Οργανισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη Συνεργασία των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας,” *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 22–53, Jun. 14, 2019.
- [18] ΑΔΜΗΕ, “ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.” Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.admie.gr/agora/rythmistiko-plaisio-agoras/kodikas-diaxeirisis-esmie>
- [19] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, “Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 714/2009, σχετικά με τους όρους πρόσβασης στο δίκτυο για τις διασυνοριακές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας,” *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. 15–35, Aug. 14, 2009.
- [20] “Κώδικας διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ),” *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, Αθήνα, Jan. 20, 2017.
- [21] ΡΑΕ, “ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΝΗΣΙΩΝ.” Jul. 2020. [Online]. Available: <https://deddie.gr/el/themata-tou-diaxeiristi-mi-diasundedemenwn-nisiwnn/ruthmistiko-plaisio-mdn/kwdikas-diaxeirisis-ilektrikwn-sustimatwn-mdn/kwdikas-diaxeirisis-mdn/>
- [22] ΔΑΠΕΕΠ, “ΚΩΔΙΚΑΣ Διαχειριστή ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης.” Jan. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.dapeep.gr/dimosieuseis/rithmistiko-plaisio/>
- [23] Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας Α.Ε., “Απόφαση 5 - Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά (Αγορά Παραγώγων) του ΕΧΕ (Έκδοση 1.4).” Sep. 04, 2021.
- [24] Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας Α.Ε., “Απόφαση 10 - Χρονοδιάγραμμα διαδικασιών Αγοράς Επόμενης Ημέρας και Ενδοημερήσιας Αγοράς.” Sep. 20, 2021.
- [25] ΑΔΜΗΕ, “ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2020 – 2030.” 12/19.
- [26] S. P. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2004.
- [27] S. W. Wallace and W. T. Ziemba, Eds., *Applications of stochastic programming*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics ; Mathematical Programming Society, 2005.
- [28] F. Oliveira, V. Gupta, S. Hamacher, and I. E. Grossmann, “A Lagrangean decomposition approach for oil supply chain investment planning under uncertainty with risk considerations,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 50, pp. 184–195, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.10.012.
- [29] M. Guignard, “Lagrangean relaxation,” *Top*, vol. 11, no. 2, pp. 151–200, Dec. 2003, doi: 10.1007/BF02579036.
- [30] R. M. Van Slyke and R. Wets, “L-Shaped Linear Programs with Applications to Optimal Control and Stochastic Programming,” *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 17, no. 4, pp. 638–663, Jul. 1969, doi: 10.1137/0117061.
- [31] G. Laporte and F. V. Louveaux, “The integer L-shaped method for stochastic integer programs with complete recourse,” *Oper. Res. Lett.*, vol. 13, no. 3, pp. 133–142, Apr. 1993, doi: 10.1016/0167-6377(93)90002-X.
- [32] Y. Huang, P. M. Pardalos, and Q. P. Zheng, *Electrical Power Unit Commitment*. Boston, MA: Springer US, 2017. doi: 10.1007/978-1-4939-6768-1.
- [33] Q. Wang, Y. Guan, and J. Wang, “A Chance-Constrained Two-Stage Stochastic Program for Unit Commitment With Uncertain Wind Power Output,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 206–215, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2159522.

- [34] S. Kaewpasuk, B. Intiyot, and C. Jeenanunta, "Stochastic unit commitment model for power system with renewable energy," in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, Mar. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075781.
- [35] L. Alvarado-Barrios, Á. Rodríguez del Nozal, J. Boza Valerino, I. García Vera, and J. L. Martínez-Ramos, "Stochastic unit commitment in microgrids: Influence of the load forecasting error and the availability of energy storage," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2060–2069, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.032.